



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DÜŞÜK GÜÇLÜ FOTOVOLTAİK ENERJİ ÜRETİMİ İÇİN  
MAKSİMUM GÜÇ NOKTASINI TAKİP EDEN ALGORİTMANIN  
GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS**

**Melih AKTAŞ**

**OCAK 2016**

**DÜZCE**

## KABUL VE ONAY BELGESİ

Melih AKTAŞ tarafından hazırlanan “Düşük Güçlü Fotovoltaik Elektrik Üretimi İçin Güneş Takip Sistemi Tasarımı” isimli lisansüstü tez çalışması, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ..... tarih ve ..... sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Üye  
(Tez Danışmanı)  
Prof. Dr. Nedim TUTKUN  
Düzce Üniversitesi

Üye  
Doç. Dr. Numan ÇELEBİ  
Sakarya Üniversitesi

Üye  
Yrd. Doç. Dr. Selman KULAÇ  
Düzce Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih : 07.01.2016

### ONAY

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Melih AKTAŞ’ın Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans derecesini almasını onamıştır.

Prof. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

07 Ocak 2016

Melih AKTAŞ



*Sevgili Anne ve Babama*

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde tez konumun belirlenmesi, geliştirilmesi ve yürütülmesi hususunda benden yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Nedim TUTKUN'a desteklerinden ötürü teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hiçbir zaman benden desteklerini esirgemeyen başta büyükbabam Mehmet AKTAŞ olmak üzere aileme ve bu çalışmada katkısı bulunan değerli çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

**07 Ocak 2016**

**Melih AKTAŞ**

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
TEŞEKKÜR .....	I
İÇİNDEKİLER .....	II
ŞEKİL LİSTESİ.....	IV
ÇİZELGE LİSTESİ.....	V
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	VI
ÖZET .....	1
ABSTRACT.....	2
EXTENDED ABSTRACT .....	3
1. INTRODUCTION .....	3
2. MATERIAL AND METHODS:.....	4
3. RESULTS AND DISCUSSIONS:.....	4
4. CONCLUSION AND OUTLOOK:.....	5
1. GİRİŞ .....	6
1.1 AMAÇ VE KAPSAM .....	6
1.2 LİTERATÜR TARAMA.....	6
2. MATERYAL VE METOT.....	12
2.1 SOLAR HÜCRE İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ .....	12
2.2 SOLAR HÜCRE İÇİN YAYGIN DEVRE MODELLERİ .....	17
2.2.1 İdeal Yaklaşık Eşdeğer Devre Modeli.....	17
2.2.2 Tek Diyot Yaklaşık Eşdeğer Devre Modeli .....	19
2.2.3 Çift Diyot Yaklaşık Eşdeğer Devre Modeli .....	21
2.3 MAKSİMUM GÜÇ ÜRETECEK SİSTEM VE TASARIMI .....	22
2.3.1 Anahtarlamalı Regülatörler.....	23
2.3.2 Gerilim Düşürücü (Buck) Regülatörler .....	23
2.3.3 Gerilim Yükseltici (Boost) Regülatörler .....	27
2.3.4 Gerilim Düşürücü ve Yükseltici (Buck-Boost) Regülatörler .....	31

<b>2.4 SİSTEM TASARIMI</b> .....	<b>35</b>
<b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	<b>41</b>
<b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	<b>56</b>
<b>5. KAYNAKLAR</b> .....	<b>58</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>60</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. 1 Türkiye güneş enerji atlası.....	7
Şekil 2. 1 Solar hücrenin ön kesit görünüşü. ....	13
Şekil 2. 2 P-N jonksiyonundaki elektronların ve oyukların ideal kısa devre akışı. ....	14
Şekil 2. 3 Denge, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı durumlarında taşıyıcı akışları. ....	15
Şekil 2. 4 Tipik bir fotovoltaik hücresi ile elektrik üretimi[19]. ....	16
Şekil 2. 5 İdeal solar hücre eşdeğer devre modeli. ....	18
Şekil 2. 6 Açık devre ve kısa devre durumları. ....	19
Şekil 2. 7 Tek diyot yaklaşık eşdeğer devre modeli. ....	20
Şekil 2. 8 Çift diyotlu yaklaşık eşdeğer devre modeli. ....	21
Şekil 2. 9 Gerilim düşürücü (buck) konvertör devre şeması. ....	25
Şekil 2. 10 Buck devresinin a) anahtar görünümü, b) Eşdeğer devreler, c) Dalga biçimleri. ....	25
Şekil 2. 11 Gerilim yükseltici (boost) konvertör devre şeması. ....	29
Şekil 2. 12 Boost devresinin a) anahtar görünümü, b) Eşdeğer devreler, c) Dalga biçimleri. ....	29
Şekil 2. 13 Gerilim düşürücü ve yükseltici (buck-boost) konvertör devre şeması. ....	33
Şekil 2. 14 Buck-Boost devresinin a) anahtar görünümü b) Eşdeğer devreler c) Dalga biçimleri. ....	33
Şekil 2. 15 Tipik bir düşüren yükselten konvertör. ....	38
Şekil 2. 16 Kontrol işaretinin elde edilmesi. ....	38
Şekil 2. 17 Genetik algoritma akış diyagramı [25]. ....	39
Şekil 3. 1 T=50 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında I-V eğrileri. ....	47
Şekil 3. 2 T=50 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında P-V eğrileri. ....	48
Şekil 3. 3 T=25 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında I-V eğrileri. ....	49
Şekil 3. 4 T=25 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında P-V eğrileri. ....	49
Şekil 3. 5 T=10 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında I-V eğrileri. ....	50
Şekil 3. 6 T=10 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında P-V eğrileri. ....	50
Şekil 3. 7 T=5 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında I-V eğrileri. ....	51
Şekil 3. 8 T=5 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında P-V eğrileri. ....	51
Şekil 3. 9 T=0 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında I-V eğrileri. ....	52
Şekil 3. 10 T=0 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında P-V eğrileri. ....	52
Şekil 3. 11 T=-5 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında I-V eğrileri. ....	53
Şekil 3. 12 T=-5 °C de G=100 ila 1200 W/m <sup>2</sup> arasında P-V eğrileri. ....	53
Şekil 3. 13 T=0 °C ve G=1000 W/m <sup>2</sup> 'de R <sub>L</sub> =0.5, 1 ve 2 Ω değerindeki yük durumları. ....	54
Şekil 3. 14 T=10 °C ve G=1000 W/m <sup>2</sup> 'de R <sub>L</sub> =0.5, 1 ve 2 Ω değerindeki yük durumları. ....	54
Şekil 3. 15 T=25 °C ve G=1000 W/m <sup>2</sup> 'de R <sub>L</sub> =0.5, 1 ve 2 Ω değerindeki yük durumları. ....	55



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa No

- Çizelge 3. 1**  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100-1200\text{ W/m}^2$  için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi.. 42
- Çizelge 3. 2**  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100-1200\text{ W/m}^2$  için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi. 43
- Çizelge 3. 3**  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100-1200\text{ W/m}^2$  için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi. 44
- Çizelge 3. 4**  $T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100-1200\text{ W/m}^2$  için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi... 45
- Çizelge 3. 5**  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100-1200\text{ W/m}^2$  için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi... 46
- Çizelge 3. 6**  $T=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100-1200\text{ W/m}^2$  için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi. 47



## SİMGELER VE KISALTMALAR

$T$	Sıcaklık
$G$	Işınım
$I$	Çıkış Akımı
$I_{ph}$	Işık Tarafından Üretilen Akım
$I_D$	Diyot Akımı
$I_p$	Paralel Sızıntı Akımı
$R_s$	Seri Direnç
$R_p$	Paralel Direnç
$V_{oc}$	Açık Devre Gerilimi
$I_o$	Diyotun Ters Doyma Akımı
$q$	Elektron Yüğü
$n$	Diyot İdealite Faktörü
$k$	Boltzmann Sabiti
$n_s$	Seri Bağlı Hücre Sayısı
$D$	Diyot
$Q$	Transistör
$V_{mpp}$	Maksimum Güç Noktasındaki Optimal Gerilim
$I_{mpp}$	Maksimum Güç Noktasındaki Optimal Akım
$P_{mpp}$	Maksimum Güç
$R_L$	Konvertör Çıkışına Bağlanan Yük
$R_{Lx}$	Modül Çıkışına İndirgenen Yük

## ÖZET

### DÜŞÜK GÜÇLÜ FOTOVOLTAİK ENERJİ ÜRETİMİ İÇİN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASINI TAKİP EDEN ALGORİTMANIN GELİŞTİRİLMESİ

Melih AKTAŞ

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nedim TUTKUN

Ocak 2016, 59 sayfa

Küresel rekabet şartları yüksek teknoloji gerektiren birçok elektrikli aygıtın fiyatlarının makul seviyelere düşmesine ve bunun sonucunda yatırım maliyetlerinin azalmasına yol açmıştır. Özellikle, yenilenebilir enerji uygulamalarında bu durum bariz bir şekilde görülmektedir. Bu yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde önem arz eden fotovoltaik enerjinin günümüzde konut, işyeri gibi birçok yerde elektrik enerjisi üretimi için gittikçe artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Konutlardaki uygulamalarda genellikle çatıya yerleştirilen sabit fotovoltaik paneller ile elektrik enerjisi üretilmektedir. Ancak fotovoltaik paneller sıcaklık ve ışınım düzeyi gibi çevresel şartlardan ciddi bir şekilde etkilenmekte, sistem verimi buna bağlı olarak azalan yönde değişmektedir. Buradaki dezavantajlı durumu gidermek için fotovoltaik sistemde her daim maksimum gücü sağlayacak şekilde bir ayarlamının yapılması gerekir. Bu durum genel olarak maksimum güç takip sistemi olarak adlandırılır ve farklı yaklaşımlar ile dizayn edilmeye çalışılır. Bu tez çalışmasında, bir konutun çatısına monte edilmiş sabit fotovoltaik sistemin anlık ışınım düzeyi ve sıcaklığa göre en yüksek güç değerine ayarlayan takip sistemi tasarlanmaya çalışılmıştır. Tasarım daha çok yazılımsal temeli esas alan bir çalışma şeklinde yürütülmüş, literatürdeki benzer çalışmalara göre görece tatminkar ve teşvik edici sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Yenilenebilir enerji uygulamaları, Fotovoltaik enerji üretimi, Maksimum güç takip sistemi, doğru akım dönüştürücüler, genetik algoritmalar ile optimizasyon

## ABSTRACT

### DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR MAXIMUM POWER POINT TRACKING TO GENERATE LOW POWER PHOTOVOLTAIC ELECTRICITY GENERATION

Melih AKTAŞ  
Düzce University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences,  
Electrical-Electronics Engineering  
Master of Science Thesis  
Supervisor: Professor Nedim TUTKUN  
January 2016, 59 pages

Terms of global competition have led to reduce the price of many electrical devices required high level technology to reasonable levels and fall in investment costs in particular; this may obviously be seen in renewable energy or similar applications. Among renewable energy sources, photovoltaic energy is increasingly used to generate electricity for homes and workplaces today. In residential buildings, power is usually generated by photovoltaic panels mounted on their roofs. However, environmental conditions such as irradiation level and temperature are extremely influential on photovoltaic panels and this leads to vary system efficiency depending on which with a sharp decrease. It is necessary to control the photovoltaic system to continuously produce its maximum power for elimination of this drawback. This is typically called maximum power point tracking system and is designed by few researchers through various approaches.

In this thesis, a design of maximum power point tracking system for photovoltaic panels mounted on a roof of a typical residential building under instantly varying irradiation level and temperature is achieved. This design is initially based on software application work and has relatively produced meaningful and encouraging outcomes with respect to those of similar works carried out so far.

**Keywords:** Renewable energy applications, Photovoltaic energy generation, Maximum power point tracking system, dc-dc converters, Optimization by genetic algorithms

## **EXTENDED ABSTRACT**

### **DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR MAXIMUM POWER POINT TRACKING TO GENERATE LOW POWER PHOTOVOLTAIC ELECTRICITY GENERATION**

Melih AKTAŞ  
Düzce University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences,  
Electrical-Electronics Engineering  
Master of Science Thesis  
Supervisor: Professor Nedim TUTKUN  
January 2016, 59 pages

#### **1. INTRODUCTION**

Recent technological developments and global warming have made renewable energy main concern for electricity generation worldwide. Many governments are pushed forward to fulfil necessary measures to promote renewable energy nationwide. Wind and photovoltaic are major renewable energy sources to generate electricity for less carbon emission in many parts of the world. Although wind system has relative advantages over photovoltaic system, use of photovoltaic energy finds itself in many applications in the world where necessary solar potential is available. It may be said that photovoltaic systems are relatively more reliable than other renewable energy systems in terms of simplicity, less maintenance and long term operation. However a photovoltaic system is affected by environmental conditions such as irradiation level and temperature as other renewable energy systems and this leads to loss of maximum power generation. There are few efforts by investigators to resolve this problem by proposing various approaches based on several techniques such as maximum power point tracking etc. This is necessary to continuously produce its maximum power in photovoltaic system for minimization of this drawback and novel designs are under consideration by few researchers through various approaches. Furthermore, a limited number of investigators have been investigating to diminish other drawbacks of

photovoltaic systems to be more efficient for future aspects.

In this study, a novel approach based on software implementation is proposed for a design of maximum power point tracking system for photovoltaic panels mounted on a roof of a typical residential building under instantly varying irradiation level and temperature.

## **2. MATERIAL AND METHODS:**

In order to design a maximum power point tracking system for increasing performance of the photovoltaic system installed in a place, I-V and P-V characteristics of a photovoltaic module should be known with dependence of temperature and irradiation level. This requires the parameter extraction from the photovoltaic module and it is described as a typical minimization problem based on reducing the error between the measured and the estimated as small as possible. The single diode model is employed to construct an objective function for parameter extraction and the genetic algorithms method is used to estimate unknown parameters such as the diode ideality factor and parasitic resistances. Once I-V and P-V characteristics of a photovoltaic module are obtained from known parameters, maximum power point can be determined by the I-V curve depending on load resistance at given temperature and irradiance level. Thus, with a simple PI control technique photovoltaic system out voltage is set to be required voltage level through dc-dc converter.

## **3. RESULTS AND DISCUSSIONS:**

The single diode circuit model and the binary-coded genetic algorithms method were used to characterized a monocrystalline photovoltaic module at various irradiance levels and temperatures. The I-V and P-V curves were obtained for a specific temperature and irradiance level and irradiance level varied from 0.1 to 1.2 kW/m<sup>2</sup> at temperatures of -5, 0, 10, 15 and 25 °C. For each case, the diode ideality factor and the parasitic resistances were estimated and maximum power point and corresponding optimal voltage and

current. Any change in temperature and irradiance level makes photovoltaic output voltage vary and a dc-dc converter is used to adjust it to optimal voltage in the load side. Thus photovoltaic system is then set to operate in optimal point to produce maximum power. This software based design relatively produced meaningful and encouraging outcomes with respect to those of similar works carried out. All the results and discussions are given in the relevant section.

#### **4. CONCLUSION AND OUTLOOK:**

The software implementation of proposed approach works well to increase the performance of a photovoltaic system under consideration. The genetic algorithms method or similar methods must be used to solve a transcendental equation obtained from the single diode circuit model after a bit manipulation. The accurate I-V and P-V curves are necessary to extract maximum power from photovoltaic system and transfer it to the load. The Buck and Boost dc-dc converter should separately be used to step down and step down the output voltage rather than Buck-Boost dc-dc converter for the same procedure. In future work, hardware implementation of this design may be achieved.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 AMAÇ VE KAPSAM

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için kullanılan fotovoltaik sistemlerin değişen çevresel şartlar nedeniyle güç kaybına uğraması, yâni enerji verimliliğinin azalması bu sistemler için en büyük dezavantaj olarak bilinmektedir. Bu bakımdan bunun giderilmesi sistemin daha performanslı çalışmasını sağlayacağı açıktır. Bu tez çalışmasında, tipik küçük güçlü fotovoltaik sistemde değişen sıcaklık ve ışınım düzeyi durumlarında o an mevcut olan en büyük güç değerinde elektrik enerjisi üretimi sağlayan yâni, maksimum güç noktasını takip eden bir yaklaşımın yazılımsal temelde gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, fotovoltaik sistemlerin elektrik devre modellerinin en temel ve doğru çalıştığı kabul edilen tek diyot modeli kullanılmış, bu modelin üretici katalog verilerinde yer almayan parametreleri genetik algoritmalar yöntemi yardımıyla bulunmuştur. Sonraki aşamada bu devre yardımıyla akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri elde edilerek maksimum güç noktaları belirlenmiştir. Daha sonra mevcut yük durumlarına göre anlık değişen sıcaklık ve ışınım düzeyi dikkate alınarak yük tarafına da-da konvertör yardımıyla maksimum aktarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasının kapsamı konut tipi uygulamalarda kullanılmak üzere 3 kW'lık fotovoltaik sistem ile sınırlı tutulmuştur. Bunun yanı sıra, sıcaklık ve ışınım düzeyi değerleri sırasıyla -5-25 °C ve 100-1200 W/m<sup>2</sup> arasında alınmıştır. Da-da konvertör ve denetleyici tasarımları bu çalışmanın konusu dışında bırakılmıştır.

## 1.2 LİTERATÜR TARAMA

Enerji ihtiyacının hızla arttığı ve günden güne pahalılaştığı ülkemizde, rüzgâr, güneş, biyogaz ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimine yönelik çalışmalar hem üniversitelerde hem de özel sektörde dikkate değer bir ivme kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevre dostu ve ucuz olması bu kaynaklara olan ilgiyi gün geçtikçe arttırmaktadır. Ülkemizde bu kaynaklar arasında rüzgâr ve güneş, diğerlerine nazaran daha fazla kullanım potansiyeline sahiptir. Öyle ki; ülkemizde rüzgâr enerjisinden yararlanma konusunda ciddi yatırımlar yapılmış lisanslı





formüllerle söz konusu parametreleri tahmin etmek için kullanılan yaklaşımlardır. Bu yöntemlerin en önemli özelliği hızlı hesaplama ve sonuçları makul olacak ölçüde doğru bulmalarıdır. Zira kullanılan analitik yöntemler oldukça basit olup daha az hesaplama zamanına gereksinim duyarlar, yâni tek bir iterasyonla istenilen sonuçlar elde edilebilir. Bu yöntemler içerisinde önerilen en basit yöntem Blas ve arkadaşları tarafından önerilen paralel direncin ihmal edildiği ve sadece dört devre parametresini içeren devre modelidir [4]. Diğer taraftan eşdeğer devrenin matematik modellerinin zorluğu nedeniyle söz konusu modelleri basitleştirmek ve parametreleri tahmin etmek için Lambert W fonksiyonu bazı araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Bu araştırmacılardan Jain ve Kapoor Lambert W fonksiyonu kullanarak parasitik dirençleri ihtiva eden karmaşık akım-gerilim karakteristiğini kabul edilebilir sınırlar içerisinde elde etmişlerdir [5]. Zira, çıkış geriliminin bir fonksiyonu olan akım eşitliğini temel matematiksel gereçler kullanarak çözmek oldukça karmaşık işlemleri gerektirir. Benzer şekilde J. Cubas ve arkadaşları Lambert W fonksiyonunu kullanarak seri direnci dönüştüren analitik formülasyonu temel alan bir yöntem önermiş, bu yaklaşımla farklı sıcaklık ve ışınım değerlerinde ticari güneş paneli performansını muhtelif yönlerden analiz etmiştir [6]. Bunun yanında Zhang ve arkadaşları Lambert W fonksiyonunu esas alan tüm solar hücre parametrelerinin basit bir eğri uydurma tekniği kullanarak bulmuşlardır [7]. Bu yaklaşım silisyum solar hücreler ve modüller, tekli organik solar hücreler, ardışık organik solar hücreler, çok-birleşimli organik hücreler gibi muhtelif sayıda solar aygıtların analiz edilmesinde kullanılmıştır. Bu ve benzeri analitik yöntemler geliştirilen bir model üzerinden bazı durumlarda doğru ve hızlı parametre tahmini yapmak için oldukça kullanışlıdır.

Ancak, bu yöntemler bazen istenilen sonuçları verme noktasında yetersiz kalabilirler. Bu bakımdan bilgisayar uygulamalı iteratif yöntemler geliştirilen bir devre modeli üzerinden parametre kestirimi için kullanılabilir. Newton-Raphson yöntemi bu tür parametre belirleme problemlerinde yaygın uygulanan kök bulma yöntemlerinden biridir. Ancak iyi belirlenmemiş başlangıç değeri ile bu yöntem yeterli hassasiyetle yakınsama yapamadığı için bir iyileştirme gerekir. Yine Ghani ve arkadaşları bu yöntem yardımıyla Lambert W-fonksiyonunu esas alarak eşdeğer devre modelindeki seri ve paralel dirençleri tahmini olarak bulmuşlardır [8]. Böylece akım net bir şekilde gerilim cinsinden ifade edilmiştir. Bu yöntemin uygulanabilirliği bilinmeyen parametre sayısı kadar denklemin ve Jakobiyen matrisin tersinin mevcut olmasını gerektirir. Aksi

durumda istenilen çözüme ulaşılması zorlaştırır. Yöntemin diğer bir zayıf tarafı ise tekillik yani sifıra bölünme durumu olup bu durumda iterasyon yapılamadığından kararsızlık durumu meydana gelir.

Analitik ve iteratif yöntemlerde karşılaşılan sorunları gidermek için bu yöntemler yerine son zamanlarda birçok araştırmacı tarafından bilgisayarla hesaplanan evrimsel algoritmaların kullanılması önerilmiştir. Bu algoritmalar genel olarak global optimizasyon teknikleri olup iteratif bir süreç yürütürler. İterasyon süreç bir başlangıç popülasyonu ile başlayıp tesadüfi bir süreç içerisinde gelişerek istenilen çözüme ulaşmaya çalışılır. Bu tür algoritmalar çoğunlukla doğada var olan biyolojik mekanizmayı taklit eder. Bunların arasında genetik algoritmalar, parçacık sürü algoritması, benzetim tavlama, yapay arı kolonisi gibi yöntemler gösterilebilir.

Genetik algoritmalar çözüme aday olan bir popülasyonu deterministik olmayan operatörler ile en iyi çözümü bulmaya yönelik çok yönlü bir arama gerçekleştirir. Bu yöntem binari ve reel sayılar ile kodlanarak bir probleme uygulanır. Zagrouba ve arkadaşları bu yöntemi kullanarak fotovoltaiik panelin bilinmeyen parametrelerini belirlemişlerdir [9]. Genetik algoritmalar global optimizasyonu bulma noktasında oldukça etkili olup problem tipine bağlı olarak hibrit genetik algoritmalar ve mikro genetik algoritmalar gibi farklı varyasyonları mevcuttur. Maherchandani ve arkadaşları Nelder-Mead deterministik teknik ile genetik algoritmaların bir kombinasyonu olarak hibrit genetik algoritmaları kullanarak bilinmeyen parametrelerin değerlerini tahmin etmiştir [10]. Burada genetik algoritmaların bulduğu sonuçlar Nelder-Mead yöntemi ile rafine edilerek daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Bir diğer popülasyon temelli yöntem ise, parçacık sürü optimizasyonu olup sürekli optimizasyon problemlerine uygulanır.

Popülasyon üyeleri arama uzayına doğru hareket eden parçacıklar olarak adlandırılır ve ziyaret edilen her bir yerin uygunluk değeri hesaplanır. Ye ve diğerleri parçacık sürü optimizasyonunu kullanarak solar hücrenin bilinmeyen parametrelerini akım gerilim karakteristiğinden hareketle belirlemiştir. Bu çalışmada yöntemin performansı tek diyotlu ve iki diyotlu modeller üzerinden genetik algoritma ile karşılaştırılmıştır. Rashidi ve arkadaşları benzetim tavlama yöntemi kullanarak bilinmeyen parametreleri tayin etmişlerdir [11]. Bu yöntemin diğer yöntemlere göre yerel minimumlardan kaçma kapasitesinin daha yüksek olduğunu öne sürmüşler ve kaotik çok kısıtlı problemlerin çözümünde kullanılabileceğini bu çalışma için göstermişlerdir.

Diğer taraftan, Ketkar ve Chopde fotovoltaik modülün bilinmeyen parametrelerinin bulunmasında yapay arı kolonisi yöntemini kullanmışlardır [12]. Bu çalışmada yöntemin bu tip problemlere uygulanmasının oldukça kolay ve optimize etme becerisinin yüksek olduğunu ve daha az kontrol parametresi gerektirdiğini göstermişlerdir. Diğer bir ilginç yaklaşım ise Subudhive Pradhantarafından önerilen bakteriyel yiyecek arama optimizasyon yöntemi olup bu yöntemle bilinmeyen parametrelerin bulunması daha az hesaplama zamanı ile gerçekleştirilmiştir [13].

Diğer taraftan, tipik bir fotovoltaik modül için kullanılan tek ve çift diyotlu devre modelleri Thevenin eşdeğer devre teoremi kullanılarak daha basite indirgenmiş, bu şekilde çevre şartlarına göre değişim gösteren parametrelerin değerleri karmaşık denklemler yerine daha basit denklemler ile tahmin edilmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalardan biri Turhan ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen ortam koşullarına bağlı dinamik bir Thevenin modeli üzerinden maksimum güç noktası takibini gerçekleştirmiştir [14]. Bu konu ile ilgili başka bir çalışma Chatterjee ve Keyhani, tarafından yürütülmüş olup bu çalışmada fotovoltaik modülün tek diyotlu eşdeğer devresinin Thevenin eşdeğerini bularak sıcaklık ve ışınım değişimleri sonucu oluşan parasitik dirençlerdeki dinamik değişimi tahmin etmişlerdir [15]. Benzer bir çalışma Batushansky ve Kuperman tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada fotovoltaik paneller için çevre şartlarına bağlı olarak sistem performansının tahmin edilmesinde kullanılmıştır [16]. Patangia ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan araştırmada yine Thevenin eşdeğer devre modeli kullanılarak dinamik koşullarda çalışan yeni bir maksimum güç noktasını takip etme kriteri geliştirmişlerdir [17].

Yukarıda verilen çalışmalardan görüldüğü üzere tipik bir fotovoltaik modülün veya solar bir hücrenin devre modeli üzerinden bilinmeyen beş parametresinin bulunması ve bu modülün optimal biçimde çalıştırılması için birçok farklı yöntem önerilmiştir. Bu modellerin performans açısından birbirlerine üstünlükleri olduğu kadar eksiklikleri de mevcuttur. Esas olarak burada istenilen parametrelerin en doğru ve en basit olarak mevcut bir model üzerinden bulunmasıdır.

Bu tez çalışmasında, tipik bir fotovoltaik modülün yaklaşık devre modeli olarak kullanılan tek ve çift diyotlu modeller esas alınarak bilinmeyen parametreler Thevenin eşdeğer devre teoremi kullanılarak bulunacaktır. Bizim önerdiğimiz çalışmada, yeni bir algoritma olarak geliştirilen dağıtılmış kurbağa sıçrama algoritması (shuffled frog

leaping algorithm-SFLA) yöntemi kullanılacaktır. Bu yaklaşımla sıcaklık ve ışınım miktarına bağlı olarak sistem performansını etkileyen diyot idealite faktörü ve parasitik rezistansları gibi parametreler tayin edilecektir. Bu noktada güneş ışınım şiddeti, panel sıcaklığı, güneş ışığı geliş açısı ölçülerek çevresel faktörlerin parametre değerlerine etkisi tespit edilecektir. Panel çıkışına eklenecek farklı yüklerle maksimum çıkış gücü üzerindeki etkenler analiz edilerek optimum çalışma noktaları elde edilmeye çalışılacaktır. Ek olarak, mevcut bölge şartları ve faktörler göz önüne alınarak, değişken yüklere bağlı olarak tipik bir fotovoltaik modelden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalar ile teyit edilecektir. Ayrıca yöntemin diğer yöntemlere göre avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi ve performansı artırıcı yönde çalışmalar yürütülecektir.

## 2. MATERYAL VE METOT

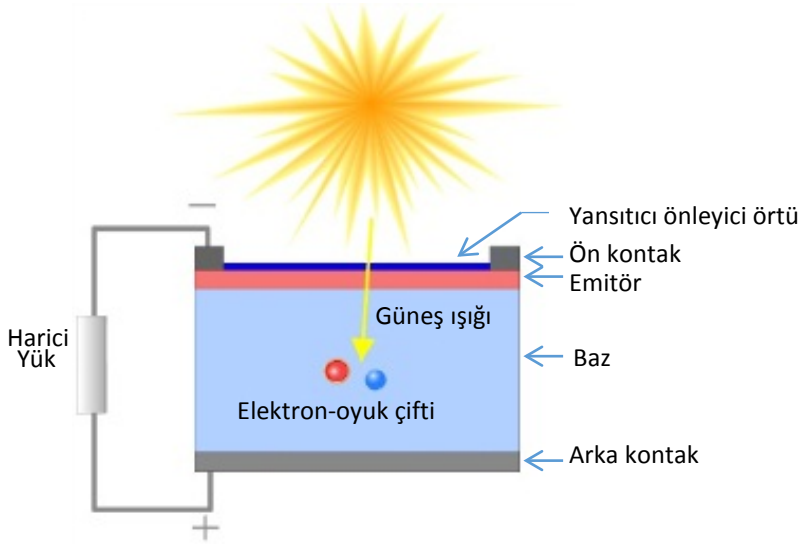
Bu bölümde uygulanan yöntemlerin ve yaklaşımların bilimsel temelleri verilerek nasıl uygulandıkları anlatılmıştır. İlk olarak, elektrik enerjisi üretiminde geniş şekilde kullanılan bir fotovoltaik (FV) modülün fiziksel içyapısı ve elektrik üretimini hangi bilimsel temellere dayalı olarak gerçekleştirdiği hakkında teorik bilgiler verilecektir. İkinci olarak, FV ile enerji dönüşümünü etkileyen sıcaklık ve ışınım miktarı gibi parametreler yaygın kullanılan elektriksel devre modelleri ve bu modellerden elde edilen matematiksel denklemler ifade edilecektir. Üçüncü olarak, mevcut koşullarda seçilen uygun devre modelini esas alan maksimum güç üretecek sistem ve tasarımı açıklanacaktır. Son olarak, değişen sıcaklık ve ışınım miktarlarına göre bilinmeyen parametrelerin bulunmasında kullanılan mikro genetik algoritmalar ve bu yöntemin uygulanması hakkında gerekli açıklama yapılacaktır.

### 2.1 SOLAR HÜCRE İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

Fotovoltaik, solar hücreleri kullanarak güneş ışığından direkt olarak elektrik üretme sürecidir. Günümüzde fotovoltaik geleneksel fosil yakıtlara alternatif olarak çok hızlı bir şekilde büyüme gösteren yenilenebilir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak elektrik üretimi yapan diğer teknolojilere kıyasla fotovoltaik teknolojisi yeni olup ilk ortaya çıkışı 1950'li yıllarda olmuştur. Fotovoltaik konusunda araştırma ve geliştirme faaliyetleri 1960'lı yıllarda ilk olarak uzay endüstrisinde uyduların gerekli olan enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılmıştır. Kullanılan bu solar hücreler günümüzdekilerden binlerce kat daha pahalı olup elektrik üretimi yöntemi bakımından daha eski bir teknolojiye sahiptir. Ancak bu solar hücreler çok hızlı büyüyen silisyum transistörün gelişimine önemli katkılar sağlamıştır. 1980'lerde solar hücreler ile ilgili yapılan araştırmalar meyvesini vermiş solar hücrelerin verimi artmaya başlamıştır. 1985'lerde silisyum solar hücreler %20'lik verime ulaşarak önemli bir dönüm noktası gerçekleşmiştir. Daha sonraki yıllarda fotovoltaik endüstrisi %15 ila %20 arasında bazı güç üretim pazarları tarafından büyük ölçüde teşvik edilen durağan bir büyüme oranı göstermiştir. 1997 yılında büyüme oranı %38'e ulaşmıştır. Günümüzde ise solar hücreler enerji üreten aygıtlar olmanın yanında şebeke bağlantısı olmayan yerlerde yaşayan insanlar için hayat kalitesini artıran aygıtlar olmuşlardır. Öyle ki bu aygıtlar gelişmiş endüstriyel ülkelerde ki geleneksel elektrik üretiminin yol açtığı çevresel

zararın etkisini önemli ölçüde ortadan kaldıran aygıtlar olarak tanına gelmiştir.

Yukarıda ifade edildiği gibi solar hücre güneş ışığından elektrik üretmek için kullanılan temel bir yapı taşıdır. Kısaca solar hücreden bahsetmek gerekirse: solar hücre güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren elektronik aygıt olarak tanımlanır. Solar hücrenin üzerine gelen ışık elektrik gücü elde etmek için hem akım hem de gerilim üretir. Bu süreç ilk olarak ışığı absorbe eden malzemedeki elektronun daha büyük enerji seviyesine yükselmesine, ikinci olarak daha büyük enerji seviyesine ulaşan bu elektronun solar hücreden dış devreye hareket etmesine gereksinim duyar. Daha sonra bu elektron dış devrede enerjisini kaybederek solar hücreye geri döner. Birçok malzeme ve süreç fotovoltaik enerji dönüşümü için potansiyel olarak gerekli şartları karşılayabilir ancak uygulamada hemen hemen bütün fotovoltaik enerji dönüşümleri P-N jonksiyon formundaki yarı iletken malzemeleri kullanır. Şekil 2. 1 solar hücrenin tipik iç yapısını göstermektedir.

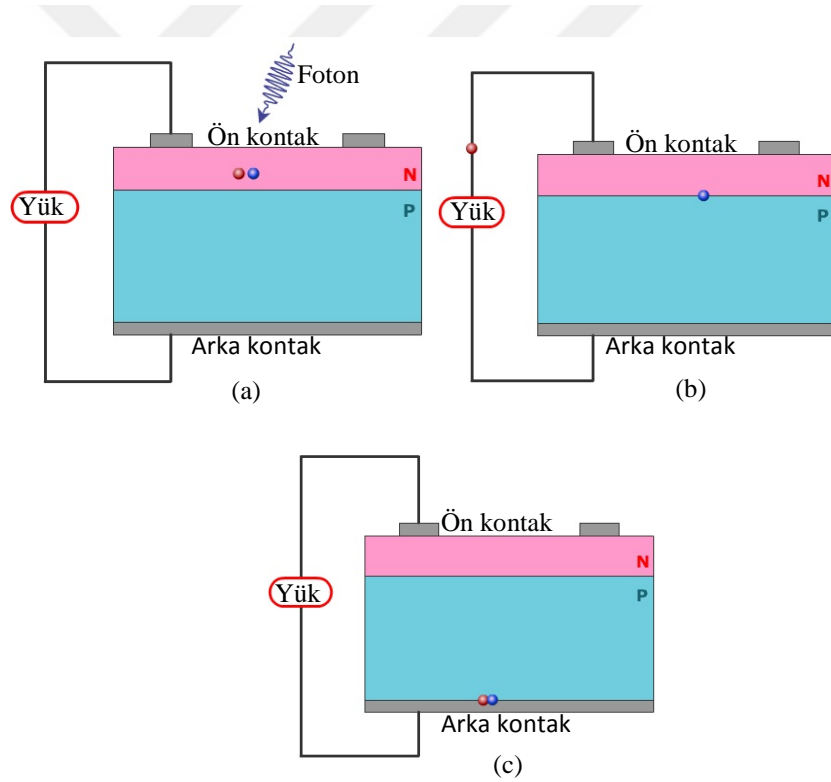


**Şekil 2. 1** Solar hücrenin ön kesit görünüşü.

Solar bir hücrenin ürettiği akım (bu akım aynı zamanda ışık oluşumlu akım olarak bilinir) iki ana süreci içerir. İlk süreç elektron-boşluk çiftlerini oluşturmak için fotonların absorbe edilmesidir. Fotonun enerji seviyesi band boşluğunun enerjisi seviyesinden daha büyük olması durumunda elektron-boşluk çiftleri solar hücrede enerji üretecektir. Oysa p tipi malzemedeki elektronlar ile n tipi malzemedeki boşluklar yarı kararlı olup yeniden birleşmeden önce azınlık taşıyıcılarının ortalama ömür süresi kadar varlıklarını korurlar. Eğer elektron veya boşluk taşıyıcısı yeniden birleşirse ışığın

ürettiği elektron-boşluk çifti kaybolur, bunun sonucunda herhangi bir akım veya güç üretilmez.

İkinci süreç, yani p-n jonksiyonu ile bu taşıyıcıların toplanması, elektron ve boşluğu uzaysal olarak ayıran p-n jonksiyonunu kullanarak yeniden bu birleşmeyi önler. Bu taşıyıcılar p-n jonksiyonunda mevcut olan elektrik alanın harekete geçmesiyle ayrılırlar. Eğer ışığın ürettiği azınlık taşıyıcısı p-n jonksiyonuna ulaşırsa, bu taşıyıcı çoğunluk taşıyıcısının olduğu jonksiyondaki elektrik alan tarafından jonksiyon boyunca yayılır. Eğer solar hücre devre kısa devre yapılırsa, ışık üreten taşıyıcılar dış devreye doğru akarlar. Azınlık taşıyıcıları yarıiletkenin metal sınırlarını geçemez ve tekrar birleşmeyi önlemek için bunlar akımın akışına katkı sağlıyorsa jonksiyon tarafından bunların toplanması gerekir. Kısa devre durumundaki ideal akış Şekil 2. 2’de gösterilmiştir.

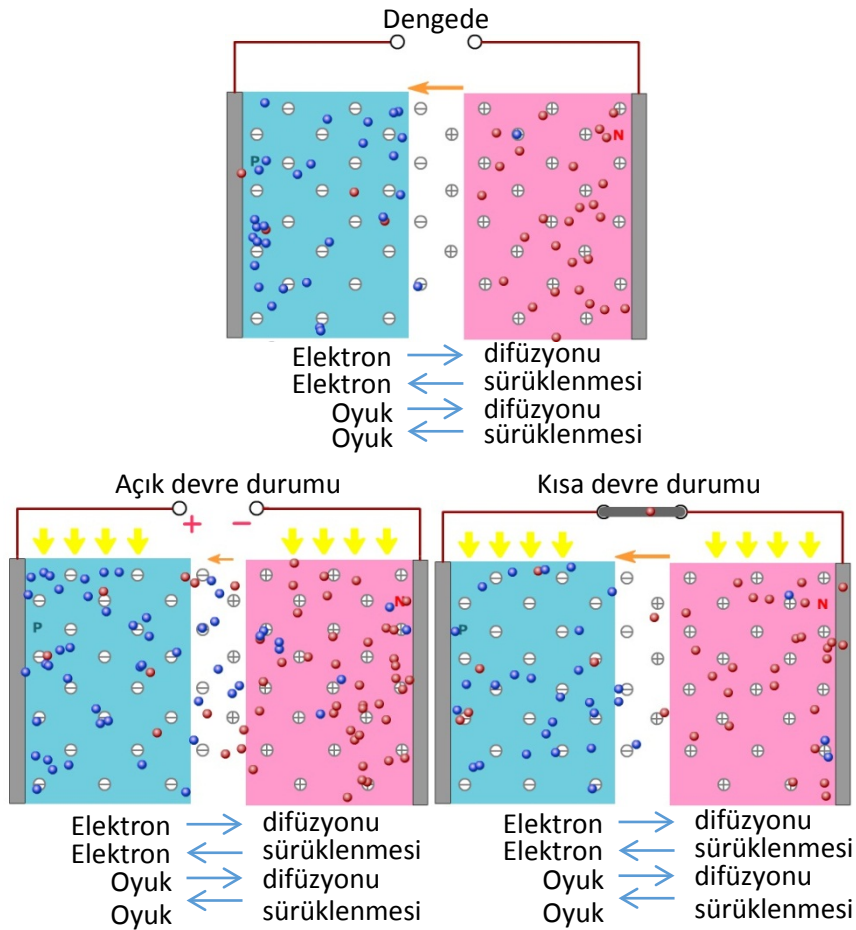


**Şekil 2. 2** P-N jonksiyonundaki elektronların ve oyukların ideal kısa devre akışı.

Işık üreten taşıyıcıların toplanması kendiliğinden güç üretiminde artış sağlamaz. Güç üretmek için akım kadar gerilimin de üretilmesi gerekir. Gerilim fotovoltaiik etki olarak bilinen bir süreç ile solar hücrede üretilir. P-N jonksiyonu ile ışık üreten taşıyıcıların toplanması elektronların N tipi malzeme kenarına, oyukların P tipi malzeme kenarına taşınmasına yol açar. Kısa devre koşullarında taşıyıcılar akım üreten ışık gibi aygıttan



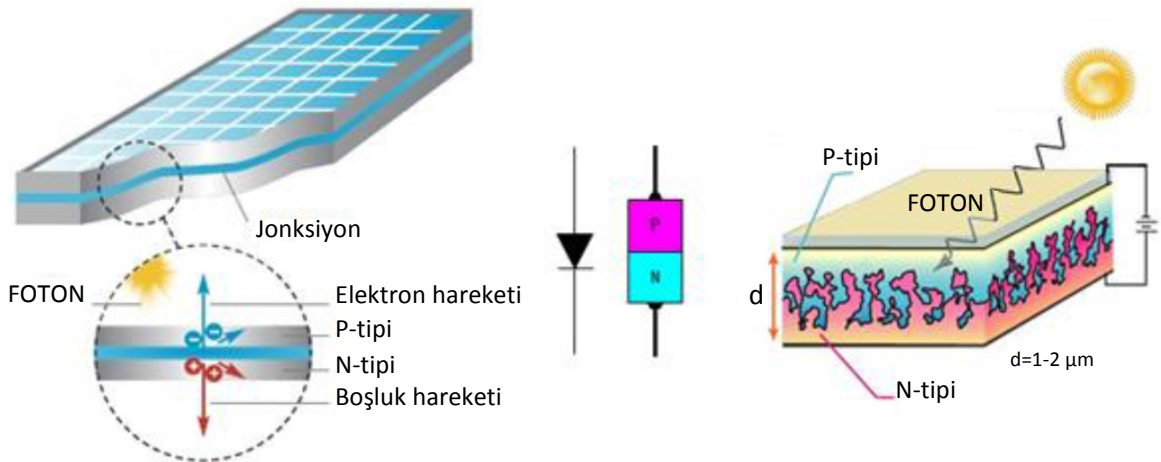
çıkarken herhangi bir yük birikmesi mevcut değildir. Hâlbuki taşıyıcıları üreten ışık solar hücreyi şayet terk ederse ışık üreten taşıyıcıların toplamı P-N jonksiyonunun N tipi tarafı üzerinde ki elektron sayısında artışa yol açar. Aynı artış P tipi malzemedeki oyuklarda da meydana gelir. Yükün bölünmesi jonksiyonda önceden mevcut olan elektrik alana ters bir elektrik alan oluşturur. Bunun sonucunda net bir elektrik alan oluşur. Bu alan ileri yönlü difüzyon akışına engel olduğundan elektrik alanın azalması difüzyon akımını arttırır. Yeni denge P-N jonksiyonu uçlarında meydana gelen gerilimin olduğu noktada oluşur. Solar hücreden gelen akım IL akımı ile ileri yön öngerilimli akımı arasındaki farktır. Açık devre şartlarında jonksiyonun ileri yön öngerilmesi ileri yön difüzyon akımı ile tam olarak dengelenen akım üreten ışığın bulunduğu noktaya kadar artarken net akım 0 olur. Bu iki akımın dengelemesine yol açacak gerekli gerilim açık devre gerilimi olarak adlandırılır. Şekil 2. 3 dengede, kısa devre akımı ve açık devre gerilimi durumlarında solar hücredeki taşıyıcı akışlarını göstermektedir.



Şekil 2. 3 Denge, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı durumlarında taşıyıcı akışları.

Burada jonksiyondan geçen akımların farklı genliklerine dikkat edilmelidir. Denge de hem difüzyon hem de sürüklenme akımı küçüktür. Kısa devre koşullarında jonksiyonun her iki tarafında ki azınlık taşıyıcı yoğunluğu ve azınlık taşıyıcılarının sayısına bağlı olan drift akımı artar. Açık devre koşullarında taşıyıcıları üreten ışık jonksiyonu ileri yönde kutuplar böylece difüzyon akımını artırır. Drift ve difüzyon akımları zıt yönlerde olduğu için açık devrede de solar hücreden gelen net akım mevcut değildir[18].

Bu hücrelerden her biri tıpkı diyotun yapısında olduğu gibi P tipi ve N tipi yarıiletken malzemelerden oluşmaktadır. Böyle bir hücre güneş ışığına maruz kaldığında, yeterli enerji miktarına sahip fotonlar sayesinde kristal içinde elektron-oyuk veya  $-$  ile  $+$  hareketli yük çiftleri oluşur. Bu yükler jonksiyon bölgesine yaklaştığında, mevcut elektrik alan nedeniyle elektronlar N bölgesine; oyuklar ise P bölgesine doğru itilirler. Bu şekilde kristalin iki bölgesinde toplanan bu yükler zıt kutuplar meydana getirip potansiyel fark oluştururlar. Böylece güneş enerjisi belli dönüştürme verimi ile elektrik enerjisine dönüşmüş olur. Güneşten gelen ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bu hücreler 0,5 ila 1 volt arasında gerilim üretirlerken 1 cm<sup>2</sup> yüzey için miliamperler seviyesinde akım veya diğer adıyla fotoakım akıtırlar. Her bir hücrenin üretmiş olduğu fotoakım miliamperler seviyesinde olduğundan büyük güçlü uygulamalarda tek bir hücrenin kullanılması mümkün olmaz. Bu nedenle istenilen düzeyde bir akım elde edebilmek için hücreler belli bir sayıya kadar seri bağlanarak modüler fotovoltaik sistem elde edilir. Yani birçok mühendislik uygulaması için kullanılan fotovoltaik modül veya panel bu şekilde elde edilir. Şekil 2. 4 tipik bir fotovoltaik modülünün kabaca iç yapısını göstermektedir.



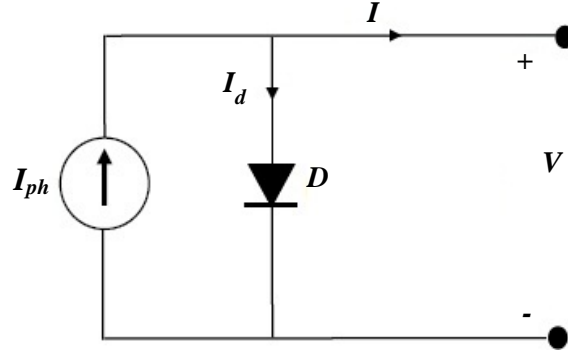
Şekil 2. 4 Tipik bir fotovoltaik hücresi ile elektrik üretimi[19].

## 2.2 SOLAR HÜCRE İÇİN YAYGIN DEVRE MODELLERİ

Deneysel veriler kullanılarak üretici firmanın katalogunda yer almayan solar hücre parametrelerinin tahmin edilmesi fotovoltaik sistemlerin performanslarının belirlenmesi için son derece önemlidir. Bu bakımdan sistemin elektriksel davranışını belirleyebilmek için birçok farklı fotovoltaik modülleri oluşturan solar hücrelerin hem matematiksel hem de elektriksel devre olarak çok az hata ile modellenmesi zorunluluk arz eder. Bu bakımdan literatürde yaygın uygulama alanı bulan tek ve çift diyotlu yaklaşık eşdeğer devreler gibi iki model üzerinde durulmuştur. Bu devre modelleri kullanılarak elde edilen matematiksel denklemler sırasıyla beş ile altı bilinmeyen parametre içerdiğinden ve söz konusu denklemler karmaşık bir yapı göstermesi nedeniyle çözümü oldukça zordur. Bu bağlamda denklem yapılarını kolaylaştırmak için devre modelleri üzerinde bir takım dönüşümler yapılarak devre modelleri basitleştirilmiştir. Bunun sonucunda bu devre modeli üzerinden elde edilen denklemler sadeleştirilerek çözüm de kolaylık sağlanmıştır. Aşağıdaki bölümlerde ideal yaklaşık eşdeğer devre modeli ile uygulamalarda yaygın biçimde kullanılan tek ve çift diyotlu devre modelleri ve bu devre modellerinin elektrik devre teoremleri ile basitleştirilmesi anlatılmıştır.

### 2.2.1 İdeal Yaklaşık Eşdeğer Devre Modeli

Yaygın olarak kullanılan eşdeğer devre modellerinin anlaşılabilmesi için ideal yaklaşık eşdeğer devre modelinin bilinmesi gerekir. Bu alt bölümde bu devre modelinden bahsedilecektir. Solar hücrenin doğru bir modelini oluşturmak için hücrede kullanılan elemanların elektriksel karakteristiklerinin bilindiği gibi fiziksel konfigürasyonlarının da bilinmesi gerekir. Solar hücre akım-gerilim karakteristiği olarak diyotta olduğu gibi üstel bir karakteristiğe sahiptir. İdeal solar hücrenin akım kaynağına paralel bağlı bir diyot ile temsil edilir. Bu model de bilinmeyen üç parametre mevcuttur. Bu parametreler diyotun idealite faktörü, üretilen fotoakım ve diyot akımıdır. Şekil 2. 5 de ideal solar hücrenin eşdeğer devre modeli gösterilmektedir.



Şekil 2. 5 İdeal solar hücre eşdeğer devre modeli.

Kirşof akım yasasından çıkartılan karakteristik denklem;

$$I = I_{ph} - I_d \quad (2.1)$$

Burada  $I$  çıkış akımını,  $I_{ph}$  üretilen fotoakımı,  $I_d$  diyot akımını temsil etmektedir.

Diyot akım denklemi,

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.3)$$

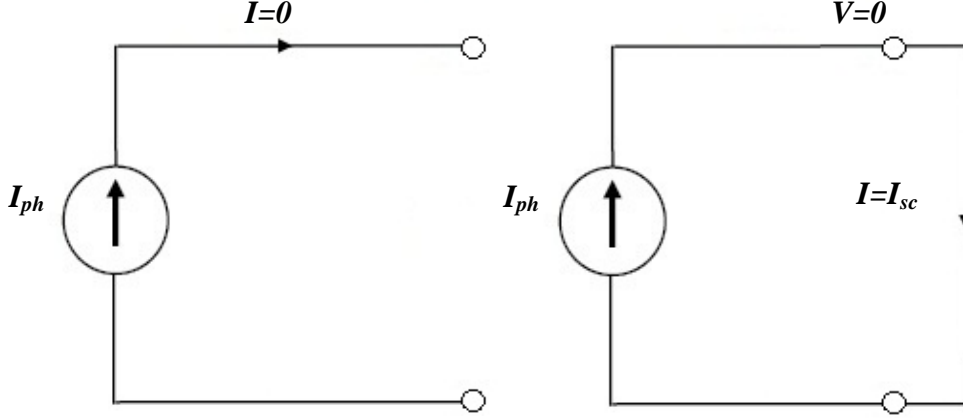
ile ifade edilir. Burada  $I_0$ ,  $n$ ,  $V_d$ ,  $V_T$ ,  $q$ ,  $k$  ve  $T$  sırasıyla diyot doyma akımı, diyot idealite faktörü, diyot uçlarındaki gerilim, termal gerilim, elektron yükü ( $1.602176 \times 10^{-19}$  C), Boltzman sabiti ( $1.380650 \times 10^{-23}$  J/K) ve kelvin cinsinden sıcaklıktır.

2.1 denkleminde diyot akımı yerine 2.2 denklemi yazılırsa çıkış akımı;

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

olur. Çıkış akımı hücre üzerine düşen ışık ile doğrudan orantılıdır. Çıkış geriliminin sıfır olduğu duruma kısa devre durumu denir. Aynı ışınım ve P-N jonksiyon sıcaklığı koşullarında, kısa devre akımı hücre tarafından üretilen akımın maksimum değerine yani fotoakıma eşit olur. Yani kısa devre durumunda  $V = 0$ ,  $I_{sc} = I = I_{ph}$  olur. Çıkış akımının sıfır olması durumuna ise açık devre durumu denir. Aynı ışınım ve P-N jonksiyon sıcaklığı koşullarında açık devre durumunda ise  $V$  gerilimi yani hücre

terminal uçlarında gerilim ulaşabileceği maksimum gerilim değerindedir.  $V = V_{oc}$ ,  $I = 0$  şeklinde ifade edilebilir [20]. Şekil 2. 6'da kısa devre ve açık devre durumları gösterilmektedir.



Şekil 2. 6 Açık devre ve kısa devre durumları.

Açık devre durumunda;

$$0 = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_d}{nV_T}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

Kısa devre durumunda;

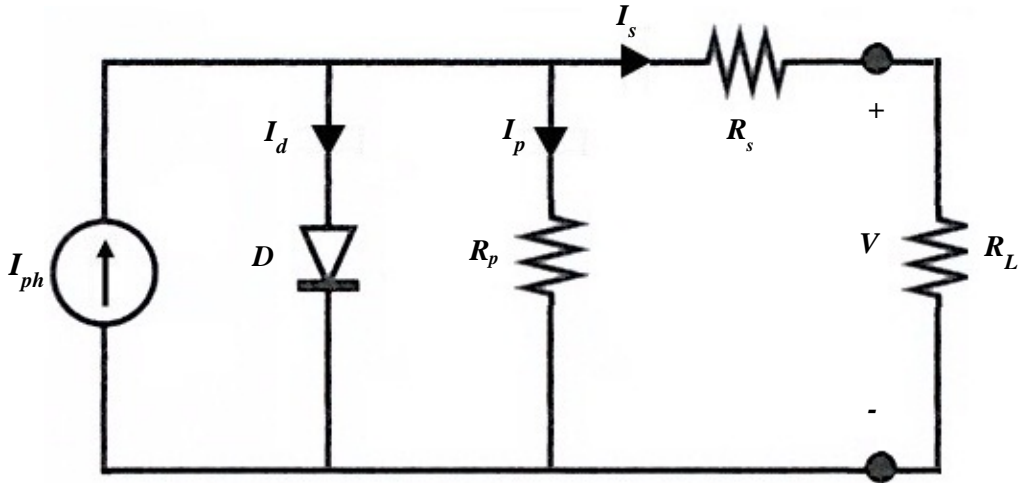
$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{0}{nV_T}} - 1 \right) \rightarrow I_{sc} = I_{ph} \quad (2.5)$$

eşitlikleri elde edilir. İdeal yaklaşık eşdeğer devre modeli kayıpların olmadığı bir modeli temsil etmektedir. Uygulamalarda ise oluşan kayıpların hesaba katılması gerekmektedir. Bu yüzden bu model kayıpları temsil eden direnç ilaveleri yapılarak geliştirilmiştir.

### 2.2.2 Tek Diyot Yaklaşık Eşdeğer Devre Modeli

Solar bir hücrenin geleneksel eşdeğer devreleri genellikle akım kaynağına paralel bağlı bir veya iki diyot ile gösterilir. Tek diyot ile gösterilen eşdeğer devre “tek diyotlu devre modeli” olarak adlandırılır. Bu model Şekil 2. 7’de gösterildiği gibi fotoakım kaynağı, kaynağa paralel diyot, kayıpları temsil eden seri bir direnç ve paralel bir dirençten oluşur. Seri direnç yarı iletken maddeden, devre yollarından, metal bağlantı

noktalarından kaynaklanan kayıpları, paralel direnç ise yarı iletken madde içerisinde oluşan kayıp akımları temsil etmektedir. Birçok durumda tek diyotlu devre modelinde 5 tane bilinmeyen parametre olduğundan bu parametrelerin matematiksel olarak belirlenmesi P-N diyot jonksiyonunun üstel denklem yapısından dolayı oldukça zordur. Bu modelde ve çift diyotlu yaklaşık eşdeğer devre modelinde bilinmeyen parametrelerin belirlenmesi için deterministik veya sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin nasıl uygulandığı ilerleyen bölümlerde ifade edilecektir.



Şekil 2. 7 Tek diyot yaklaşık eşdeğer devre modeli.

Kirşof akım yasası bu modele uygulanırsa,

$$I_{ph} = I_d + I_p + I \quad (2.6)$$

karakteristik denklemi elde edilir. Paralel direnç üzerindeki gerilim diyot uçları arasındaki gerilime eşittir. Diyot uçları arasındaki gerilim ise seri direnç ve yük üzerinde bulunan gerilimlerin toplamına eşittir. Bu durumda paralel direnç üzerinden geçen akım,

$$I_p = \frac{V_{R_s} + V}{R_p} = \frac{I R_s + V}{R_p} \quad (2.7)$$

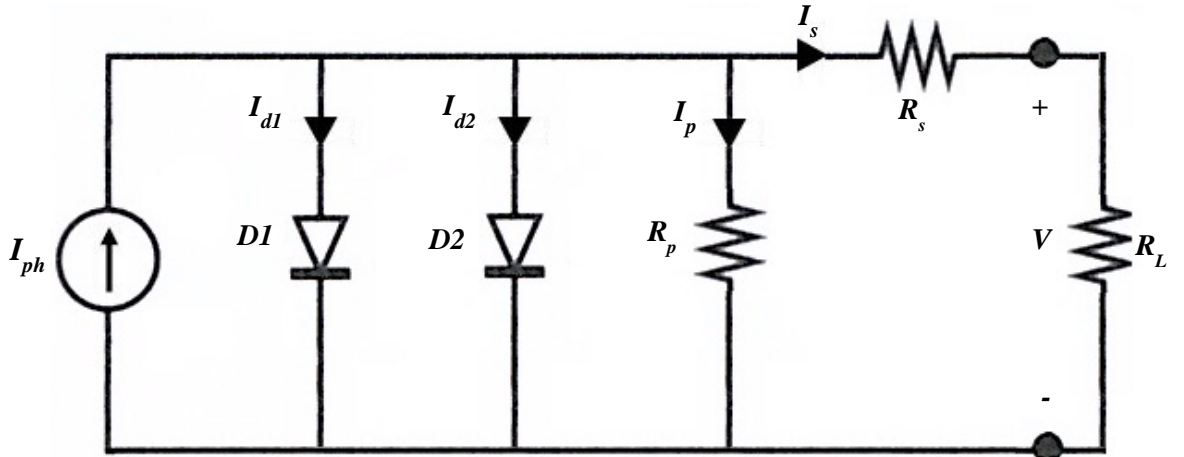
ile bulunur. Eşitlik 2.2'de verilen diyot akım denklemi ve eşitlik 2.7 de verilen paralel direnç üzerinden geçen akım eşitlik 2.6'de yazılırsa,

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{I R_s + V}{n V_T}} - 1 \right) - \frac{I R_s + V}{R_p} \quad (2.8)$$

tek diyotlu yaklaşık eşdeğer devre modeli için akım-gerilim karakteristik denklemi elde edilmiş olur. Bu denklemde üretici katalog verilerinde yer almayan beş parametre bulunmaktadır. Bu parametreler  $I$ ,  $I_{ph}$ ,  $n$ ,  $R_s$ ,  $R_p$  sırasıyla çıkış akımı, üretilen fotoakım, diyot idealite faktörü, seri ve paralel dirençlerdir. Bu model ideal yaklaşık eşdeğer devreye sadece seri direnç bağlanarak oluşturulan modelden daha doğru sonuç vermektedir ancak daha uzun bir hesaplama süresi gerektirir.

### 2.2.3 Çift Diyot Yaklaşık Eşdeğer Devre Modeli

Bu model tek diyotlu yaklaşık eşdeğer devre modeline ilave bir paralel diyot eklenmesi ile elde edilir. Şekil 2. 8 solar bir hücrenin çift diyotlu yaklaşık eşdeğer devre modelini göstermektedir. Bu modelde tek diyotlu eşdeğer devre modelinden farklı olarak eklenen diyotun akımı ve idealite faktörü sebebiyle bilinmeyen parametre sayısı 7'dir.



Şekil 2. 8 Çift diyotlu yaklaşık eşdeğer devre modeli.

Bu diyot daha hassas I-V karakteristik eğrisi elde etmek için ilave edilir. Bu modelde solar hücre diyota paralel bağlanmış akım kaynağı olarak modellenmiştir. Ancak uygulamada akım kaynağı aynı zamanda başka bir diyot ile paralel bağlanmıştır. İlave olarak solar hücre metal kontakları ve yarıiletken malzemenin gövde direnci solar hücrenin paralel bağlı elemanlarına seri bağlı bir direnç ile gösterilmiştir.

Bu devrede Kirşof akım yasası uygulanırsa,

$$I_{ph} = I_{d1} + I_{d2} + I_p + I \quad (2.9)$$

karakteristik denklemi elde edilir.

$$I_{d1} = I_{0d1} \left( e^{\frac{IR_s+V}{n_{d1}V_T}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

$$I_{d2} = I_{0d2} \left( e^{\frac{IR_s+V}{n_{d2}V_T}} - 1 \right) \quad (2.11)$$

Eşitlik 2.9’da  $I_{d1}$  ve  $I_{d2}$  yerine 2.10 ve 2.11 eşitliği yazılması durumunda,

$$I = I_{ph} - I_{0d1} \left( e^{\frac{IR_s+V}{n_{d1}V_T}} - 1 \right) - I_{0d2} \left( e^{\frac{IR_s+V}{n_{d2}V_T}} - 1 \right) - \frac{IR_s+V}{R_p} \quad (2.12)$$

denklemini elde edilir. Bu denklemde bilinmeyen parametreler  $I_{0d1}$ ,  $I_{0d2}$ ,  $I_{ph}$ ,  $n_{d1}$ ,  $n_{d2}$ ,  $R_s$ ,  $R_p$  olmak üzere yedi adettir.

Tek diyot denklemi n diyot idealite faktörünü sabit bir değer olarak kabul eder. Gerçekte ise bu faktör yarıiletken aygıtın uçları arasındaki gerilimin bir fonksiyonudur. Yüksek gerilimde yarıiletken aygıttaki yeniden birleşme yüzeyler ve malzemenin iç kısmındaki bölgeler tarafından domine edildiğinde idealite faktörü bire yaklaşır. Oysa daha düşük voltajlarda jonksiyondaki yeniden birleşme daha baskın olur ve idealite faktörü ikiye yaklaşır. Jonksiyonun tekrarlı birleşimi birinci modele paralel ikinci bir diyot eklenerek ve diyot idealite faktörü ikiye ayarlanarak modellenir. Literatür araştırmaları bu modelin solar hücrenin elektriksel devre olarak ifade edilmesinde tek diyotlu devre modeline göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir [21],[22].

### 2.3 MAKSİMUM GÜÇ ÜRETECEK SİSTEM VE TASARIMI

Bu kısımda, mevcut koşullarda seçilen devre modeli ile maksimum güç aktarımı yapacak bir sistemin nasıl tasarlanacağı açıklanacaktır. Burada gerçekleştirilecek tasarım donanımsal olmaktan ziyade MATLAB/SIMULINK ortamında yapılacaktır. Mevcut koşullarda aktarılan gücün maksimum olabilmesi için yükün üzerindeki gerilimin optimal değerde olması gerekir. Bu değer belirlenmesi fotovoltaik sistemin güç-gerilim karakteristiği dikkate alınarak yapılır. Belirlenen bu gerilim değeri DA/DA çeviriciler yardımıyla elde edilir. Fotovoltaik sistemin gün içerisinde üretmiş olduğu gerilim ve akım değerleri değişiklik gösterdiğinden optimal gerilim değeri bazen yüksek bazen de düşüktür. Bu bakımdan fotovoltaik sistemin çıkışına bağlanan DA/DA çevirici hem düşürücü hem de yükseltici işlevlerini yerine getirmesi gerekir. Bu çalışmada hem yükseltme hem de düşürme görevini kademeli olarak yerine getiren “Buck-Boost”



çeviriciyle yapmak mümkündür. Aşağıdaki kısımlarda bu çeviriciler ve uygulanması hakkında bilgiler verilmektedir.

### **2.3.1 Anahtarlama Regülatörler**

DA/DA çeviriciler değişken bir DA giriş geriliminden sabit bir DA gerilimi elde etmek için kullanılan anahtarlama regülatörleridir. Gerilim regülasyonu için genelde sabit frekanslı darbe genişlik modülasyonu, anahtarlama elemanı olarak ise genelde BJT, MOSFET ve IGBT gibi yarı iletken aygıtlar kullanılır. Direnç yüklü çeviricilerin çıkışı sürekli olmayıp harmonikler içerir. Dalgalanma miktarı genelde bir LC filtre devresi ile mümkün olduğunca azaltılır.

Anahtarlama regülatörleri tümleşik devre olarak bulmak mümkündür. Anahtarlama frekansı kullanılan osilatörün RC elemanlarının değerlerini uygun seçerek belirlenebilir. Çeviricinin verimini maksimum yapmak için, en küçük osilatör periyodu transistörün anahtarlama periyodunun yaklaşık yüz katı olmalıdır. Örneğin, transistör anahtarlama periyodu  $0.5 \mu s$  ise, osilatör periyodu  $50 \mu s$  olmalı; buna göre en yüksek osilatör frekansı  $20 \text{ kHz}$  olmalıdır. Bu kısıtlama transistördeki anahtarlama kayıplarını en aza indirmek içindir. Transistör anahtarlama kayıpları frekans arttıkça artar ve bunun sonucunda toplam verimin düşmesine yol açar. Kontrol gerilimi  $V_c$  çıkış geriliminin arzu edilen değeriyle karşılaştırılması sonucu elde edilir. Kuvvetlendirici çıkışındaki  $V_{cr}$  testere dişi gerilim  $v_r$  ile karşılaştırılarak DA çevirici için darbe genişlik modülasyonu kontrol işareti üretilir. Anahtarlama çeviriciler için dört temel topoloji vardır. Bunlar sırasıyla;

1. Gerilim düşürücü çeviriciler
2. Gerilim yükseltici çeviriciler
3. Gerilim düşürücü ve yükseltici çeviriciler

### **2.3.2 Gerilim Düşürücü (Buck) Regülatörler**

Gerilim azaltıcı bir regülatörde ortalama çıkış gerilimi  $V_a$  girişteki  $V_s$  kaynak geriliminden küçüktür. Bu nedenle "düşüren" regülatör olarak adlandırılır ve yaygın biçimde bir çok uygulamada kullanılır. [6, 7]. BJT kullanarak tasarlanmış düşürücü bir regülatör devresi Şekil 2. 9'de gösterilmiştir. Burada, Q1 transistörü kontrollü bir anahtar olarak çalışırken  $D_m$  diyodu serbest dolaşım diyodu olarak görev yapar. Bu iki

eleman tek-kutuplu-iki-konumlu bir anahtar gibi davranır. Şekil 2. 9'daki devre çoğunlukla Şekil 2. 10a'da gösterildiği gibi iki konumlu anahtarla temsil edilir ve çalışması iki modda gerçekleşir. 1. Mod,  $t=0$  anında Q1 transistörü iletime geçince başlar. Giriş akımı; L endüktörü, C kapasitörü ve R yük direncinden artarak akar. 2. Mod transistör  $t=t_1$ 'de kesime sokulunca başlar. Dm serbest döngü diyodu, endüktörde biriken enerjiden dolayı iletimde kalır. Depo edilen bu enerjinin aktığı akım L, C, R ve Dm yolu üzerinden akmaya devam eder. Q1 transistörü bir sonraki çevrim için tekrar iletime geçinceye kadar endüktör akımı azalarak akmaya devam eder. Çalışma modlarına karşılık gelen eşdeğer devreler Şekil 2. 10b'de gösterilmiştir. L endüktöründen geçen akımın sürekli olması durumunda gerilim ve akım dalga biçimleri Şekil 2. 10c'de verilmiştir. Burada endüktörden geçen akımın doğrusal olarak arttığı ve azaldığı kabul edilmiştir. Oysa uygulamada kullanılan devrelerde anahtarın sonlu ve doğrusal olmayan bir direnci olduğu görülmüştür. Anahtarlama frekansına bağlı olarak L endüktörü ve C kapasitöründen geçen akım süreksiz olabilir. L endüktörü uçlarındaki gerilim, genel olarak, şu biçimde tanımlanır:

$$e_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.13)$$

Endüktör akımının  $I_1$ 'den  $I_2$ 'ye doğrusal olarak  $t_1$  süresinde yükseldiği kabul edilirse

$$V_s - V_a = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \frac{\Delta I}{t_1} \quad (2.14)$$

$$t_1 = \frac{\Delta I L}{V_s - V_a} \quad (2.15)$$

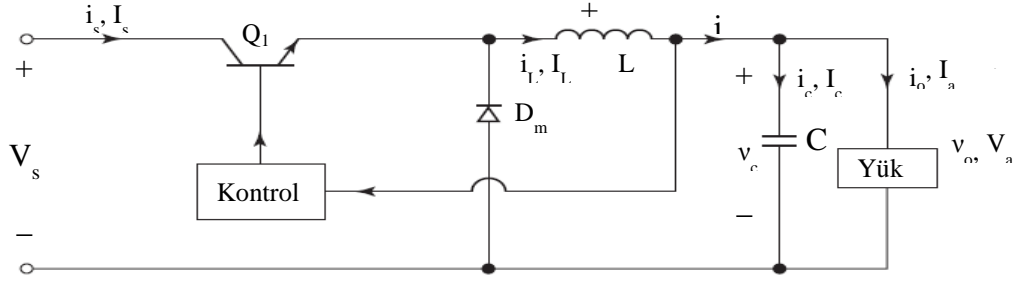
yazılabilir. Endüktör akımının  $I_2$ 'den  $I_1$ 'e doğrusal olarak  $t_2$  süresinde düştüğü kabul edilirse

$$-V_a = -L \frac{\Delta I}{t_2} \quad (2.16)$$

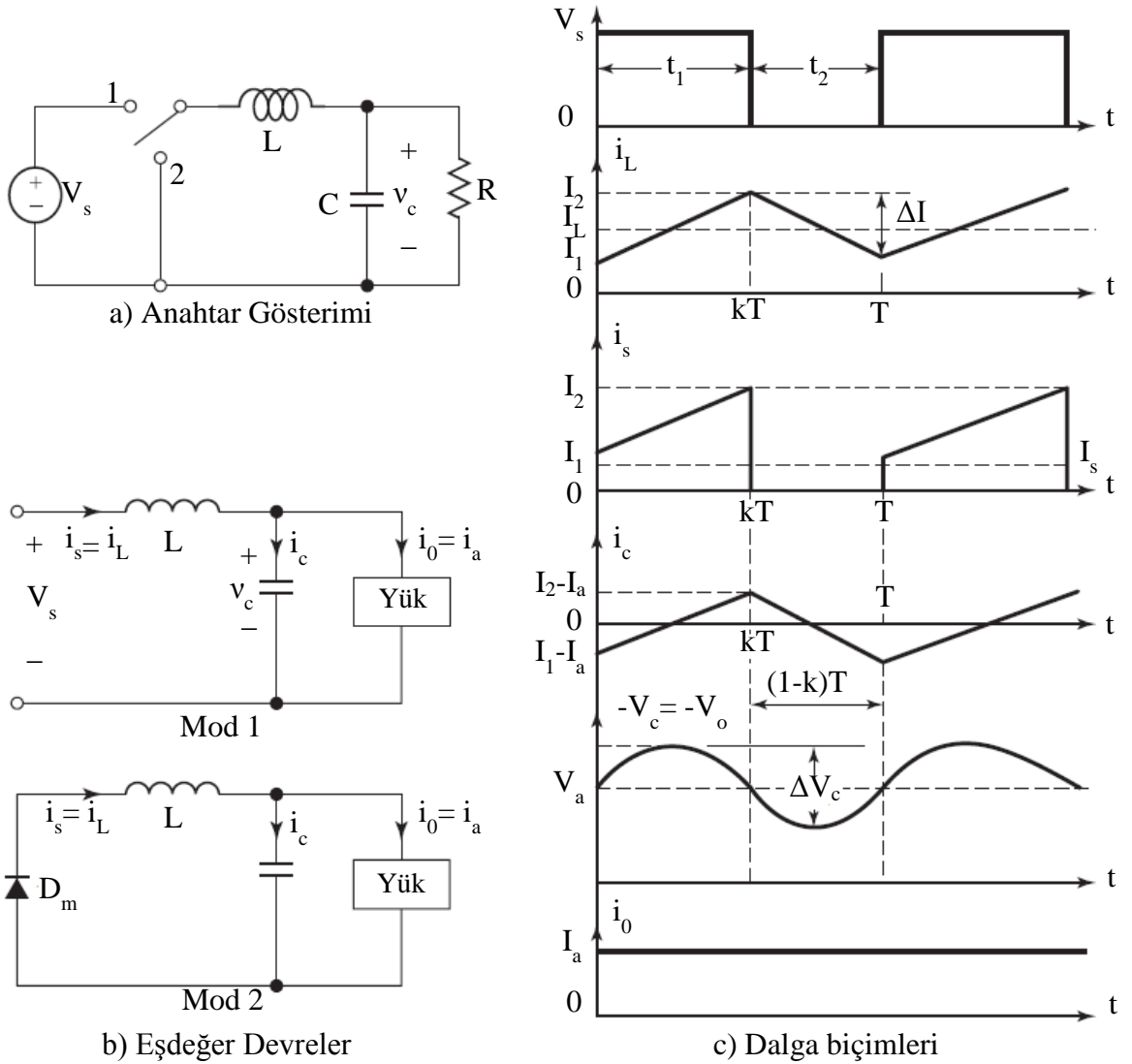
$$t_2 = \frac{\Delta I L}{V_a} \quad (2.17)$$

yazılabilir. Burada  $\Delta I = I_2 - I_1$  değeri L endüktöründeki tepeden tepeye akım değişimidir. (2.14) ve (2.16) denklemlerinde verilen  $\Delta I$  değerlerini eşitlersek:

$$\Delta I = \frac{(V_s - V_a)t_1}{L} = \frac{V_a t_2}{L} \quad (2.18)$$



**Şekil 2. 9** Gerilim düşürücü (buck) konvertör devre şeması.



**Şekil 2. 10** Buck devresinin a) anahtar görünümü, b) Eşdeğer devreler, c) Dalga biçimleri.

Bu denklemlerde  $t_1 = kT$  ve  $t_2 = (1 - k)T$  denklemleri yerine konulursa, ortalama çıkış gerilimi elde edilir.

$$V_a = V_s \frac{t_1}{T} = kV_s \quad (2.19)$$

Devrenin kayıpsız ve  $V_s I_s = V_a I_a = kV_s I_a$  olduğunu kabul edilirse, ortalama giriş akımı bulunabilir.

$$I_s = kI_a \quad (2.20)$$

Anahtarlama periyodu T aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I L}{V_s - V_a} + \frac{\Delta I L}{V_a} = \frac{\Delta I L V_s}{V_a (V_s - V_a)} \quad (2.21)$$

Bu ifadeden tepeden tepeye dalgalanma akımı bulunur:

$$\Delta I = \frac{V_a (V_s - V_a)}{f L V_s} \quad (2.22)$$

$$\Delta I = \frac{V_s k (1 - k)}{f L} \quad (2.23)$$

Kirchoff'un akım yasasına göre  $i_L$  endüktör akımı şu biçimde ifade edilebilir:

$$i_L = i_c + i_0 \quad (2.24)$$

Yükteki dalgalanma akımı  $\Delta i_0$ 'nun ihmal edilecek ölçüde olduğunu varsayarsak,  $\Delta i_L = \Delta i_c$  olur. Kapasitörden  $(t_1/2) + (t_2/2) = T/2$  kadar bir süre boyunca artı yönde akan akımın ortalama değeri

$$I_c = \frac{\Delta I}{4} \quad (2.25)$$

olarak hesaplanır. Kapasitör gerilimi

$$v_c = \frac{1}{C} \int i_c dt + v_c(t = 0) \quad (2.26)$$

biçiminde ifade edildiğinden, Kapasitörde tepeden tepeye dalgalanma gerilimi

$$\Delta V_c = v_c - v_c(t = 0) = \frac{1}{C} \int_0^{T/2} \frac{\Delta I}{4} dt = \frac{\Delta I T}{8C} = \frac{\Delta I}{8fC} \quad (2.27)$$

olur. Denklem (2.22) veya (2.23)'den  $\Delta I$ 'nin değerini denklem (2.27)'de yerine koyacak olursak,

$$\Delta V_c = \frac{V_a(V_s - V_a)}{8LCf^2V_s} \quad (2.28)$$

Veya

$$\Delta V_c = \frac{V_s k(1-k)}{8LCf^2} \quad (2.29)$$

elde edilir. Endüktör dalgalanma akımı,  $\Delta I = 2I_L$  olur.

Denklem (2.19) ve (2.23)'ü kullanarak,

$$\frac{V_s k(1-k)}{fL} = 2I_L = 2I_a = \frac{2kV_s}{R} \quad (2.30)$$

Bu denklem yardımıyla kritik endüktans değeri  $L_c$  bulunur:

$$L_c = L = \frac{(1-k)R}{2f} \quad (2.31)$$

Ortalama Kapasitör gerilimi  $V_c$  ise, Kapasitör dalgalanma gerilimi  $\Delta V_c = 2V_a$  olur.

Denklem (2.19) ve (2.29) 'ü kullanarak

$$\frac{V_s(1-k)k}{8LCf^2} = 2V_a = 2kV_s \quad (2.32)$$

buradan da kritik Kapasitör sığası  $C_c$  bulunur:

$$C_c = C = \frac{(1-k)}{16Lf^2} \quad (2.33)$$

Yük akımının di/dt değişim hızı L endüktörü tarafından sınırlanır. Gerilim azaltıcı regülatör devresinde sadece bir transistör gerekir bu şekilde kullanılan bir devrenin verimi yüksektir. Ancak, giriş akımı süreksiz olup girişte ki akımı düzgülendirecek bir filtreye gerek vardır. Çıkış geriliminin polaritesi sabit olup akımı tek yönde akar. Diyotun kısa devre olması ihtimaline karşı koruma devresi gerekir.

### 2.3.3 Gerilim Yükseltici (Boost) Regülatörler

Yükselten bir regülatörde [8, 9] ortalama çıkış gerilimi  $V_a$  girişteki  $V_s$  kaynak geriliminden yüksektir MOSFET kullanılarak elde edilen regülatör devresi Şekil 2. 11'de gösterilmiştir. Bu devrede  $M_1$  transistörü kontrollü bir anahtar olarak çalışır ve  $D_m$  diyotu serbest dolaşım diyotu olarak kullanılır. Şekil 2. 11'deki devre genellikle Şekil 2. 12a'da gösterildiği gibi iki konumlu bir anahtarla gösterilir ve iki modda çalışır.

1. modda,  $t=0$  anında  $M_1$  transistörü ilettime geçince başlar. Giriş akımı  $L$  endüktörü ve  $M_1$  transistörü üzerinden belli oranda artarak akmaya başlar. 2. moddaki çalışma ise  $M_1$  transistörünün  $t = t_1$ 'de kesime sokulması ile başlar. Çalışma modlarına karşılık gelen eşdeğer devreler Şekil 2. 12b'de gösterilmiştir. Yük akımının sürekli olması durumu için gerilim ve akım dalga biçimleri Şekil 2. 12c'de verilmiştir. Akımın doğrusal olarak arttığı ve azaldığı kabul edilmiştir.

Endüktör akımının  $I_1$  'den  $I_2$ 'ye doğrusal olarak  $t_1$  süresinde yükseldiği kabul edilirse,

$$V_s = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \frac{\Delta I}{t_1} \quad (2.34)$$

ve ya

$$t_1 = \frac{\Delta I}{V_s} L \quad (2.35)$$

yazılabilir. Endüktör akımı  $I_2$  'den  $I_1$ 'e doğrusal olarak  $t_2$  süresinde azalır ve bu durum (2.36) ve (2.37) denklemleri ile ifade edilir.

$$V_s - V_a = -L \frac{\Delta I}{t_2} \quad (2.36)$$

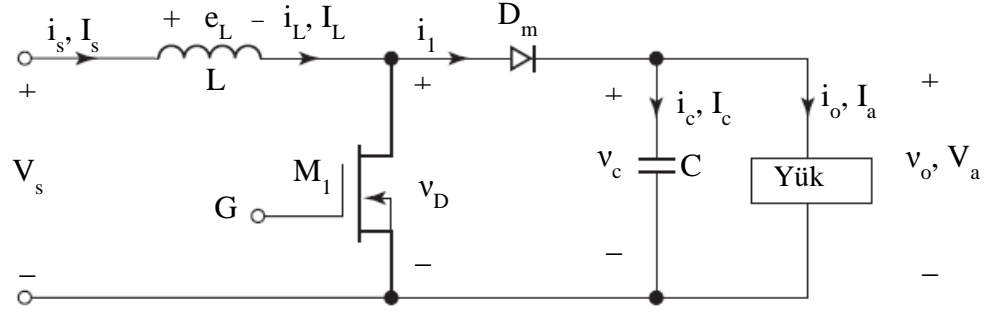
$$t_2 = \frac{\Delta I L}{V_a - V_s} \quad (2.37)$$

elde edilir. Burada  $\Delta I = I_2 - I_1$  değeri  $L$  endüktöründeki tepeden tepeye akım dalgalanmasıdır. Denk. (2.34) ve (2.35)'den hareketle denklem (2.38) aşağıdaki gibi ifade edilir.

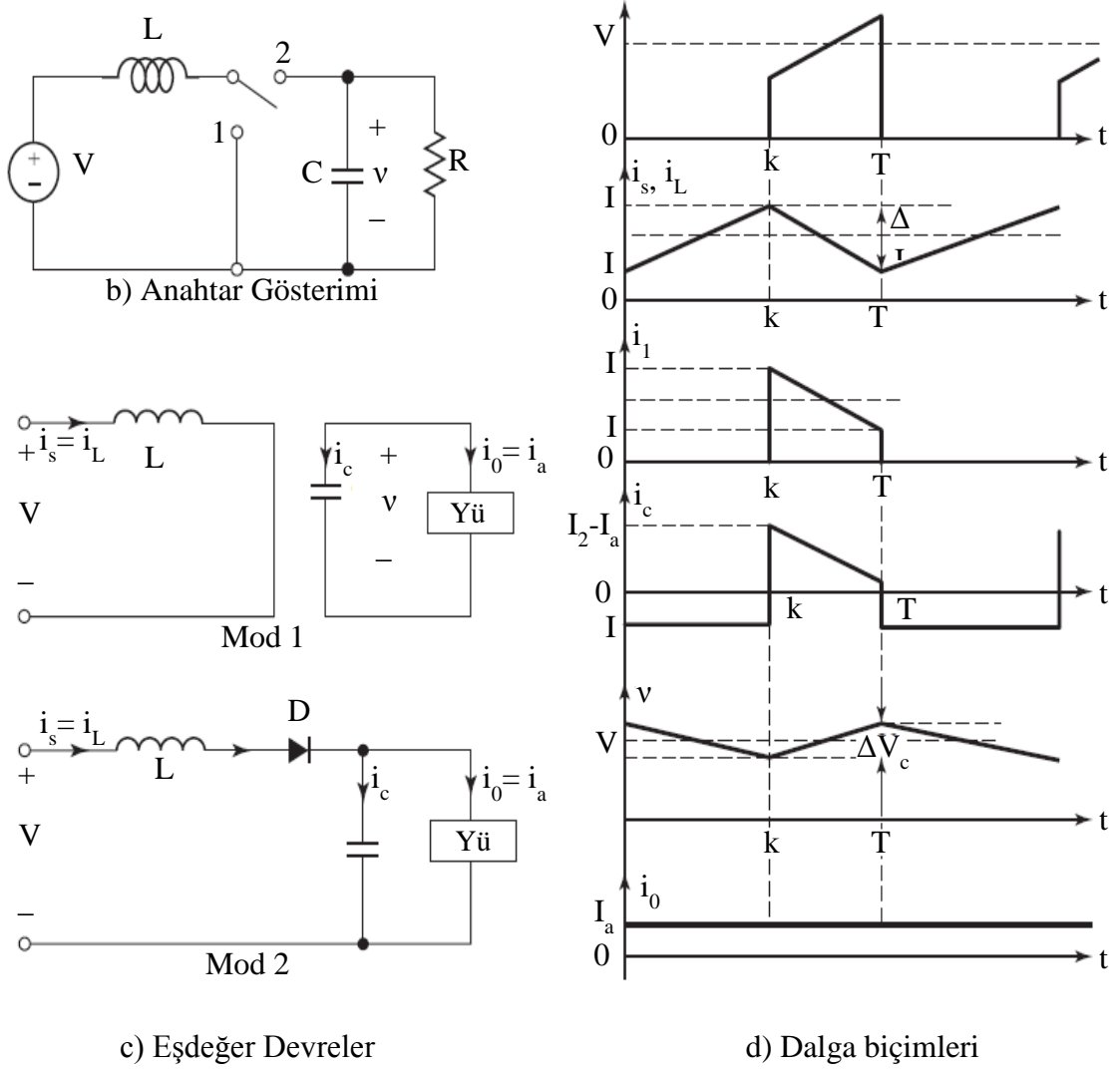
$$\Delta I = \frac{V_s t_1}{L} = \frac{(V_a - V_s) t_2}{L} \quad (2.38)$$

Bu denklemde  $t_1 = kT$  ve  $t_2 = (1 - k)T$  olarak yerlerine konulursa, ortalama çıkış gerilimi elde edilir:

$$V_a = V_s \frac{T}{t_2} = \frac{V_s}{1 - k} \quad (2.39)$$



Şekil 2. 11 Gerilim yükseltici (boost) konvertör devre şeması.



Şekil 2. 12 Boost devresinin a) anahtar görünümü, b) Eşdeğer devreler, c) Dalgı biçimleri.

Buradan,

$$1 - k = \frac{V_s}{V_a} \quad (2.40)$$

Denk. (2.40)'de  $k = t_1/T = t_1 f$  yerleştirildiğinde,

$$t_1 = \frac{(V_a - V_s)}{V_a f} \quad (2.41)$$

olur. Devrenin kayıpsız olduğunu varsayarsak,  $V_s I_s = V_a I_a = k V_s I_a$  ortalama giriş akımı:

$$I_s = \frac{I_a}{1 - k} \quad (2.42)$$

Anahtarlama periyodu T aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I L}{V_s} + \frac{\Delta I L}{V_a - V_s} = \frac{\Delta I L V_a}{V_s (V_a - V_s)} \quad (2.43)$$

Bu ifadeden tepeden tepeye dalgalanma akımı bulunur:

$$\Delta I = \frac{V_s (V_a - V_s)}{f L V_a} \quad (2.44)$$

veya

$$\Delta I = \frac{V_s k}{f L} \quad (2.45)$$

Transistör iletimde iken,  $0 < t < t_1$  süresince yük akımını kapasitör sağlar. Bu süredeki ortalama kapasitör akımı  $I_c = I_a$  olur ve kapasitörde tepeden tepe ve dalgalanma gerilimi

$$\Delta V_c = v_c - v_c(t = 0) = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} I_c dt = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} I_a dt = \frac{I_a t_1}{C} \quad (2.46)$$

Denk.(5.72)'den  $t_1 = \frac{(V_a - V_s)}{V_a f}$  yerine konursa

$$\Delta V_c = \frac{I_a (V_a - V_s)}{V_a f C} \quad (2.47)$$

veya



$$\Delta V_c = \frac{I_a k}{fC} \quad (2.48)$$

Ortalama endüktör akımı  $I_L$  ise sürekli iletim için endüktör dalgalanma akımı  $\Delta I = 2I_L$  kritik koşulunu sağlamalıdır.

Denk. (2.39) ve (2.45)' yı kullanarak,

$$\frac{kV_s}{fL} = 2I_L = 2I_s = \frac{2V_s}{(1-k)^2} \quad (2.49)$$

ifadesinden endüktansın kritik değeri elde edilir:

$$L_c = L = \frac{k(1-k)^2 R}{2f} \quad (2.50)$$

Eğer  $V_c$  ortalama kapasitör gerilimi ise, sürekli iletim için kritik koşul, kapasitör dalgalanma geriliminin  $\Delta V_c = 2V_a$  olmasıdır. Denk. (2.48)'u kullanarak

$$\frac{I_a k}{Cf} = 2V_a = 2I_a R \quad (2.51)$$

yazılabilir. Buradan da kapasitör için kritik sığa değeri  $C_c$  bulunur:

$$C_c = C = \frac{k}{2fR} \quad (2.52)$$

Yükseltici regülatör, transformatör olmaksızın gerilimi yükseltebilmektedir. Tek transistör kullanımı nedeniyle yüksek verime sahiptir. Giriş akımı sürekli olup büyük bir akım güç transistöründen akar. Çıkış gerilimi k doluluk oranındaki değişikliklere çok duyarlı olup ve regülatörün kararlılığını sağlamak bu bakımdan zor olabilir. Ortalama çıkış akımı ortalama endüktör akımından (1-k) kat daha küçüktür. Bu nedenle kapasitörden akan akımın etkin değeri daha büyük olur. Bunun sonucunda azaltıcı regülatördeki kapasitör ve endüktörden daha büyük değerde kapasitör ve endüktör kullanmak gerekir.

### 2.3.4 Gerilim Düşürücü ve Yükseltici (Buck-Boost) Regülatörler

Düşürücü ve yükseltici regülatörler çıkış geriliminin giriş geriliminden küçük veya büyük olabileceği durumlarda kullanılırlar. Bu tip regülatörün devresi Şekil 2. 13'da verilmiştir. Bu devrede Q1 transistörü kontrollü anahtar olarak çalışırken,  $D_m$  diyotu kontrolsüz anahtar olarak çalışır. Bu iki eleman birlikte iki konumlu bir anahtar gibi

çalışır. Şekil 2. 13'deki devre çoğunlukla Şekil 2. 14a'daki iki konumlu anahtarlı bir devre ile gösterilir.

Devre iki modda çalışabilir. Birinci modda, Q1 transistörü iletimde,  $D_m$  diyotu da ters gerilim altında kesimdedir. Giriş akımı Q1 ve endüktör üzerinden artarak akar. 2. modda Q1 transistörü kesime sokulur ve endüktörde akmakta olan akım, L, C,  $D_m$  ve yük üzerinden akmaya başlar. Endüktörde depolanan enerji bu şekilde yüke aktarılır ve endüktörden akan akım Q1 transistörü bir sonraki periyotta yeniden iletime sokulana kadar azalır. Bu çalışma modları için eşdeğer devreler Şekil 2. 14c'de verilmişlerdir. Düşürücü-yükseltici regülatörün sürekli bir yük akımı için kalıcı durumdaki akım ve gerilim dalga biçimleri Şekil 2. 14d'de gösterilmişlerdir.

Endüktör akımının  $t_1$  süresi içinde  $I_1$ 'den  $I_2$ 'ye doğrusal olarak arttığı kabul edilirse,

$$V_s = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \frac{\Delta I}{t_1} \quad (2.53)$$

veya

$$t_1 = \frac{\Delta I L}{V_s} \quad (2.54)$$

Endüktör akımı da  $t_2$  süresinde  $I_2$ 'den  $I_1$ 'e doğrusal olarak azalırsa

$$V_a = -L \frac{\Delta I}{t_2} \quad (2.55)$$

veya

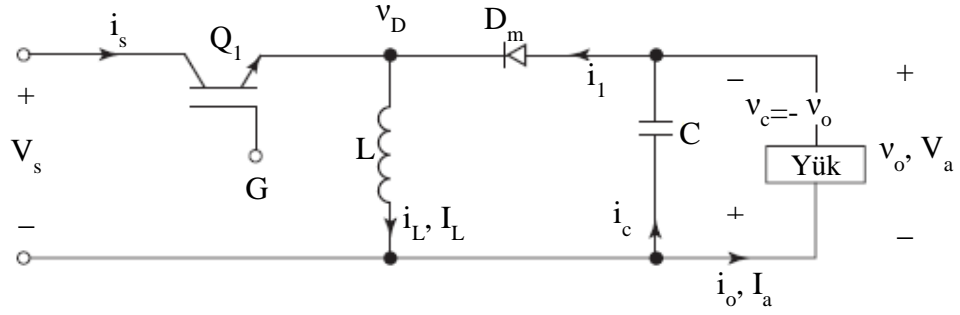
$$t_2 = \frac{-\Delta I L}{V_a} \quad (2.56)$$

İfadelerini bulmak mümkündür. Burada  $\Delta I = I_2 - I_1$  değeri endüktör akımının tepeden tepeye dalgalanmasıdır. Denk. (2.53) ve (2.55)'ten,

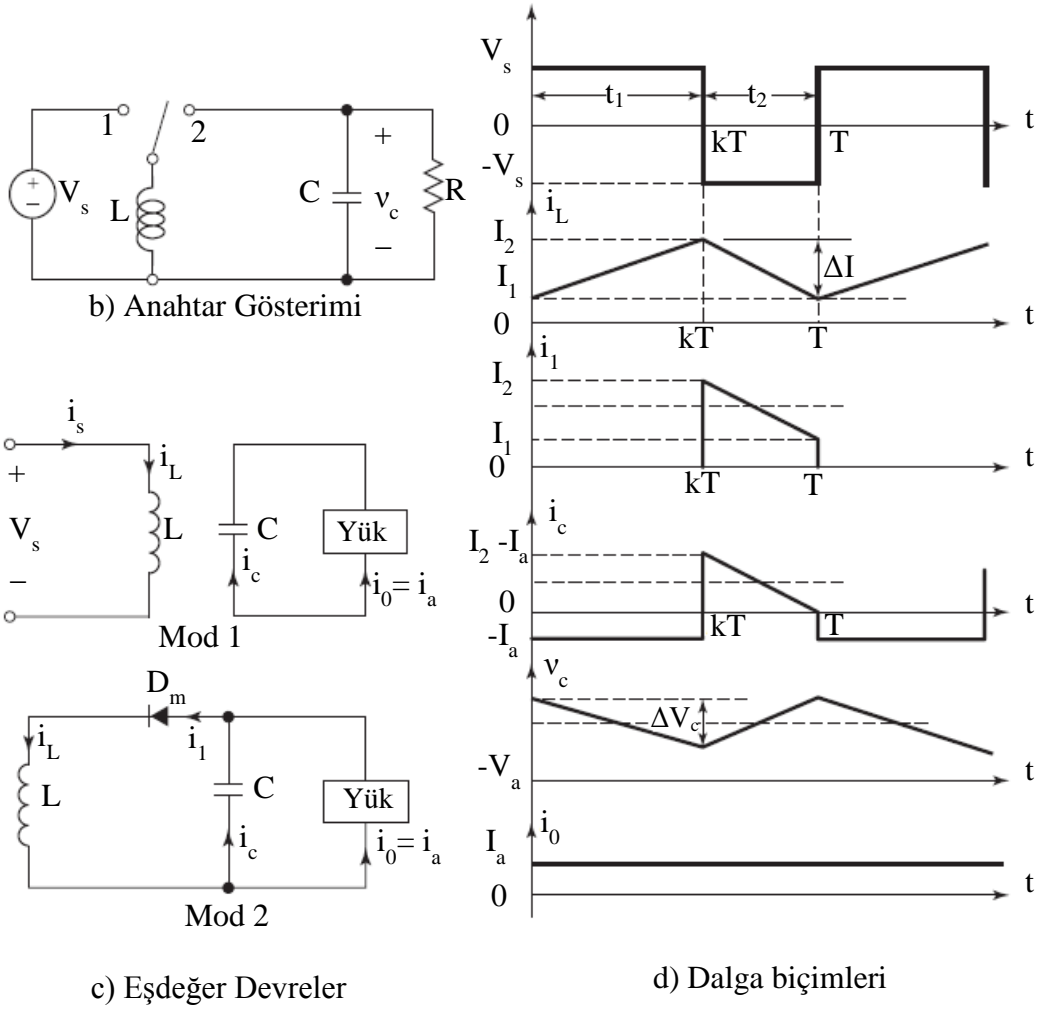
$$\Delta I = \frac{V_s t_1}{L} = \frac{-V_a t_2}{L} \quad (2.57)$$

$t_1 = kT$  ve  $t_2 = (1 - k)T$  olduğu dikkate alınır, ortalama çıkış gerilimi:

$$V_a = -\frac{V_s}{1 - k} \quad (2.58)$$



Şekil 2. 13 Gerilim düşürücü ve yükseltici (buck-boost) konvertör devre şeması.



Şekil 2. 14 Buck-Boost devrenin a) anahtar görünümü b) Eşdeğer devreler c) Dalga biçimleri.

olur. Denk. (2.57) 'da  $t_1 = kT$  ve  $t_2 = (1 - k)T$  yerleştirilirse,

$$1 - k = \frac{-V_s}{V_a - V_s} \quad (2.59)$$

$t_2 = (1 - k)T$  ve Denk. (2.59)'de elde edilen  $(1 - k)$  Denk. (2.58) 'da yerine konulursa,

$$t_1 = \frac{V_a}{(V_a - V_s)f} \quad (2.60)$$

Devrenin kayıpsız olduğu kabul edilirse  $V_s I_s = -V_a I_a = (1 - k)V_s I_a$  ve ortalama giriş akımı  $I_s$  ile ortalama yük akımı  $I_a$  arasındaki bağıntı bulunur.

$$I_s = \frac{I_a k}{(1 - k)} \quad (2.61)$$

Anahtarlama periyodu  $T$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I L}{V_s} - \frac{\Delta I L}{V_a} = \frac{\Delta I L (V_a - V_s)}{V_s V_a} \quad (2.62)$$

Buda tepeden tepeye dalgalanma akımını verir:

$$\Delta I = \frac{V_s V_a}{f L (V_a - V_s)} \quad (2.63)$$

veya

$$\Delta I = \frac{V_s k}{f L} \quad (2.64)$$

Ortalama endüktör akımı:

$$I_L = I_s + I_a = \frac{k I_a}{1 - k} + I_a = \frac{I_a}{1 - k} \quad (2.65)$$

$Q_1$  transistörü iletimdeyken,  $0 < t < t_1$  süresince yük akımını kapasitör sağlar. Bu süredeki ortalama kapasitör akımı  $I_c = -I_a$ , olur ve kapasitörde tepeden tepe ve dalgalanma gerilimi

$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} -I_c dt = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} I_a dt = \frac{I_a t_1}{C} \quad (2.66)$$

Denk.(2.60)'dan  $t_1 = \frac{V_a}{(V_a - V_s)f}$  yerine konursa

$$\Delta V_c = \frac{I_a V_a}{(V_a - V_s) f C} \quad (2.67)$$

veya

$$\Delta V_c = \frac{I_a k}{fC} \quad (2.68)$$

Ortalama endüktör akımı  $I_L$  ise sürekli iletim için endüktör dalgalanma akımı  $\Delta I = 2I_L$  kritik koşulunu sağlamalıdır.

Denk. (2.58) ve (2.64)'ü kullanarak,

$$\frac{kV_s}{fL} = 2I_L = 2I_s = \frac{2V_s}{(1-k)^2} \quad (2.69)$$

ifadesinden endüktansın kritik değeri elde edilir:

$$L_c = L = \frac{(1-k)R}{2f} \quad (2.70)$$

Eğer  $V_c$  ortalama kapasitör gerilimi ise, sürekli iletim için kritik koşul, kapasitör dalgalanma gerilimi  $\Delta V_c = -2V_a$  olmasıdır. Denk. (2.68)'i kullanarak

$$\frac{I_a k}{cf} = 2V_a = 2I_a R \quad (2.71)$$

yazılabilir. Buradan da kapasitör için kritik sığa değeri  $C_c$  bulunur:

$$C_c = C = \frac{k}{2fR} \quad (2.72)$$

Düşürücü-yükseltici regülatör, transformatör olmadan çıkış geriliminin polaritesinin değişimini sağlar. Tek transistör kullanımı nedeniyle yüksek verime sahiptir. Transistörün hatalı çalışması durumunda, hata akımının  $di/dt$  değişim oranı  $L$  endüktörü tarafından  $V_s/L$  şeklinde sınırlanır. Çıkışa kısa devre koruması yerleştirmek kolaydır. Ancak, giriş akımı kesiklidir ve  $Q_1$  transistöründen yüksek tepe akımları akar[23].

## 2.4 SİSTEM TASARIMI

Bu tez çalışmasında, tipik bir konutta elektrik üretimi için kullanılan sabit fotovoltaik panellerden yüke maksimum güç aktaran, güç takip sisteminin tasarımı ele alınmaktadır. Bu tasarımda anlık sıcaklık ve ışınım seviyesi değişen fotovoltaik sistemde azalan gücün tekrar maksimum güç noktasına getirilmesi için meta-sezgisel tekniğe dayalı bir yaklaşım önerilmektedir.

Genetik algoritma için amaç fonksiyonunun elde edilmesi;

Tek diyotlu yaklaşık devre modelinden elde edilen denk(2.8)'de verilen eşitlik ile üretici katalog bilgileri kullanılarak amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Aşağıda bu fonksiyonun türetilme adımları gösterilmiştir[24].

Kısa devre durumunda  $I_{ph}=I_{sc}$ ,  $V=0$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 e^{\frac{I_{sc}R_s}{n_s V_T}} - \frac{I_{sc}R_s}{R_p} \quad (2.73)$$

Maksimum güç noktasında  $I=I_{mpp}$ ,  $V=V_{mpp}$

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 e^{\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_s}{n_s V_T}} - \frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_s}{R_p} \quad (2.74)$$

Açık devre durumunda  $I=0$ ,  $V=V_{oc}$

$$I_{oc} = 0 = I_{ph} - I_0 e^{\frac{V_{oc}}{n_s V_T}} - \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (2.75)$$

Maksimum güç noktasında gücün gerilime göre türevi;

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{\substack{V=V_{mpp} \\ I=I_{mpp}}} = 0 \quad (2.76)$$

Kısa devre durumunda akımın gerilime göre türevi

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{sc}} = -\frac{1}{R_p} \quad (2.77)$$

Denk.(2.73)'den  $I_0$  akımı

$$I_0 = \left( I_{sc} - \frac{V_{oc}-I_{sc}R_s}{R_p} \right) e^{-\frac{V_{oc}}{n_s V_T}} \quad (2.78)$$

$$I_{mpp} = I_{sc} - \frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_s-I_{sc}R_s}{R_p} - \left( I_{sc} - \frac{V_{oc}-I_{sc}R_s}{R_p} \right) e^{\frac{V_{mpp}+I_{mpp}R_s-V_{oc}}{n_s V_T}} \quad (2.79)$$

$$-\frac{1}{R_p} \left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{sc}} = \frac{\frac{I_{sc}R_s-V_{oc}}{n_s V_T} \frac{1}{R_p}}{1 + \frac{(I_{sc}R_p-V_{oc}+I_{sc}R_s)e^{\frac{I_{sc}R_s-V_{oc}}{n_s V_T}}}{n_s V_T R_p} + \frac{R_s}{R_p}} \quad (2.80)$$

Denk (2.81)' de y değeri 10000'de 1 hata ile 0'a yaklaştırılmıştır ve amaç fonksiyonu türetilmiştir.

$$y = \frac{\frac{(I_{sc}R_p - V_{oc} - I_{sc}R_s)e^{\frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s V_T}} - 1}{n_s V_T R_p} \frac{1}{R_p}}{1 + \frac{(I_{sc}R_p - V_{oc} + I_{sc}R_s)e^{\frac{I_{sc}R_s - V_{oc}}{n_s V_T}} + \frac{R_s}{R_p}}{n_s V_T R_p}} + \frac{1}{R_p} \quad (2.81)$$

Amaç fonksiyonu genetik algoritma ile çözülmüştür.

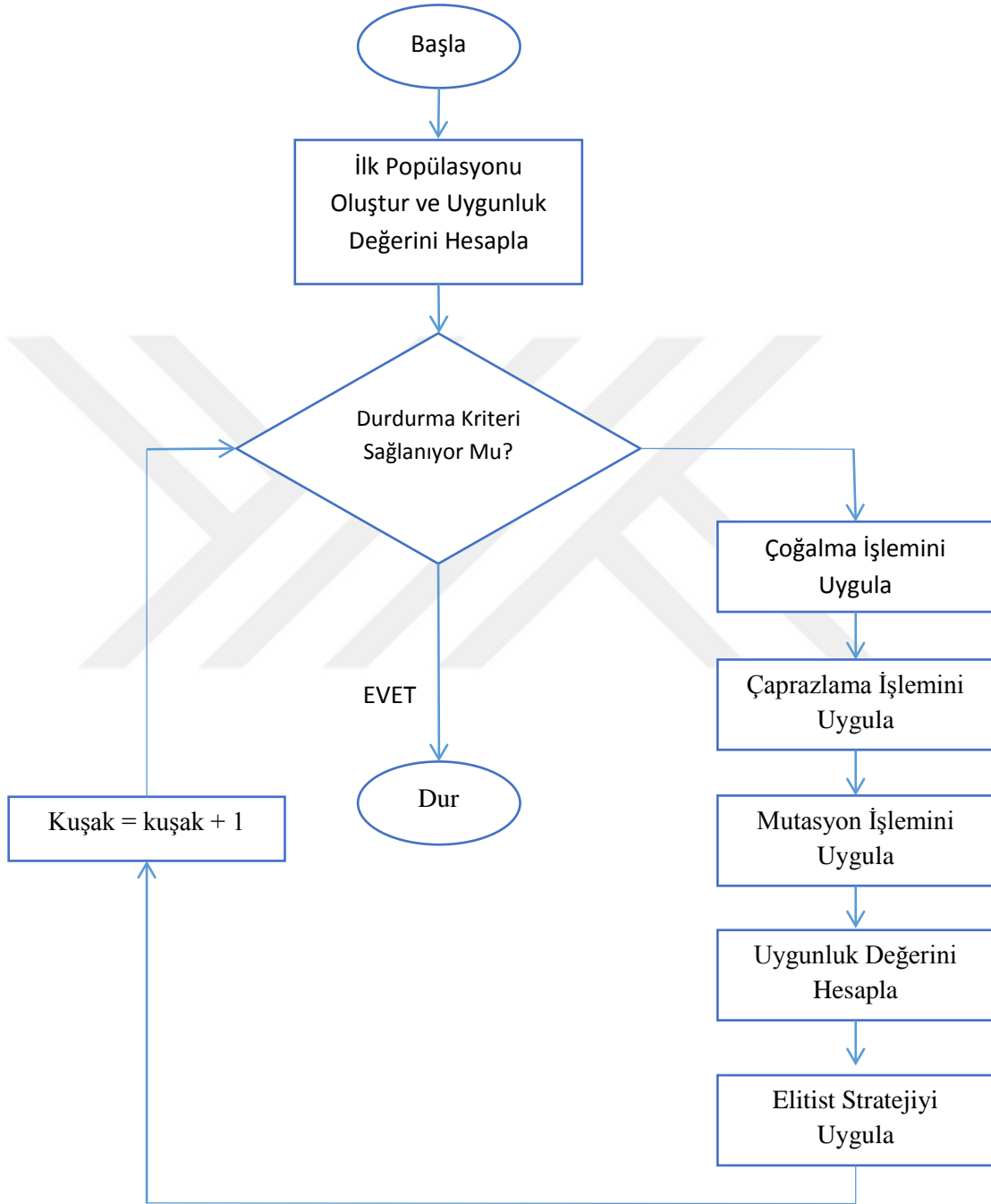
Bu yaklaşımda sıcaklık ve ışınım seviyesi ile değişen fotovoltaiik sistemin çıkış gerilimi, elde edilen akım-gerilim karakteristiği yardımıyla maksimum güç değerini veren gerilim değerine kullanılan bir çevirici yardımıyla (düşürücü-yükseltici konvertör) getirilir. Burada fotovoltaiik sistemin çıkışındaki anlık gerilim, anlık sıcaklık ve ışınım seviyesine bağlı olarak elde edilen akım-gerilim eğrisi kullanılarak bulunur. Hesap edilen gerilim değeri DA/DA konvertörün doluluk oranının (duty-cycle) kontrol edilmesi ile maksimum güç değerine karşılık gelen çıkış gerilimi değerine ayarlanır.

Fotovoltaiik panelin akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri meta-sezgisel yöntem olan genetik algoritmalar vasıtasıyla tek diyotlu eşdeğer devre modeli ile bulunur. Bu devre modelinde fotovoltaiik panelin diyot idealite faktörü ve parasitik dirençler gibi bilinmeyen üç parametresi çevre şartlarından etkilenen anlık sıcaklık ve ışınım miktarına göre tek diyot devre modeli kullanılarak tahmin edilir. Kullanılan tahmin modeli fotovoltaiik modülün üretici firması tarafından verilen bilgi sayfasındaki verilerden ve grafiklerden yararlanır. Bu veriler muhtelif sıcaklık ve ışınım miktarlarına göre deneysel olarak elde edilmiş, buna göre akım-gerilim ve güç-gerilim grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerde en önemli veriler kısa devre akımı ve açık devre gerilimleridir. Bu değerler her sıcaklık ve ışınım seviyesine göre değişirken bunlara bağlı bilinmeyen parametreler ayrıca değişmektedir. Şekil 2. 15'de maksimum güç üreten fotovoltaiik sistemin blok diyagramını göstermektedir. Şekil 2. 16'de görüldüğü üzere yük uçlarındaki gerekli gerilim değerini elde etmek için DA/DA konvertör uygun bir şekilde anahtarlanır. Yâni, doluluk oranı gerekli olan yük gerilimini verecek şekilde ayarlanır. Bu tasarımda kullanılan konvertör çeşidi düşürücü-yükseltici DA/DA konvertör türü olup doluluk oranı denklem (2.58)'ten hesaplanır. Burada ortalama çıkış gerilimi fotovoltaiik sistemin çıkış gerilimi 0 ila  $V_{oc}$  değerleri arasında olacağından denklem (2.58) bu sınır değerlerine göre revize etmek gerekir. Yani k doluluk oranı





mutasyona uğratılmışlardır. Her bir jenerasyonda bulunan en iyi çözüme karşılık gelen string elitist strateji kullanılarak yeni popülasyon içinde tutulmuştur. Genetik algoritmanın genel karakteristiği olarak başlangıç popülasyonu büyüklüğü 100, jenerasyon sayısı ise 200 ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 2. 17 Genetik algoritma akış diyagramı [25].

Her bir durum için elde edilen akım-gerilim karakteristikleri kullanılarak iletkenlik değerleri bulunur. Mevcut yük direncinin iletkenlik değeri hesap edilerek akım-gerilim eğrisi üzerindeki yeri şerit (spline) enterpolasyon yöntemi ile hesaplanır. Burada

fotovoltaik sistemin çıkış gerilimi bulunur. Yukarıda ifade edilen tasarım her bir ışınım seviyesi ve sıcaklık değerine göre yazılımsal olarak çalıştırılmış elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde verilmiştir.



### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada yazılım temelli tasarlanan sıcaklık ve ışınım düzeyi sırasıyla -5 ila -50 santigrat derece, 100-1200 W/m<sup>2</sup> değerleri arasında değiştirilmiştir. Sıcaklığın ve ışınım düzeyinin etkisini tam olarak görebilmek için sıcaklık sabitlik tutulup ışınım düzeyi değiştirilmiş ve ışınım miktarı sabit tutulup sıcaklık değiştirilmiştir. Burada ki her bir durum için fotovoltaiik panelin akım-gerilim karakteristikleri elde edilmiştir. Daha sonra bu karakteristikler yardımıyla maksimum güç değerleri ve bu güç değerlerini maksimum akım ve gerilim değerleri bulunmuştur. Burada her bir durumda fotovoltaiik modülden maksimum gücü elde etmek için hangi gerilim değerinin gerekli olduğu hesaplanmıştır. Dolayısıyla sıcaklı ve ışınım miktarı gibi çevresel şartların değişimi fotovoltaiik panelin o anda maksimum gücü verebilmesi için hangi gerilim değerine ayarlanması belirlenmiştir. Fotovoltaiik panel çıkışındaki gerilimin maksimum gücü vermek için düşürülmesi söz konusu ise düşürücü DA/DA konvertör kullanılmış yükseltilmesi durumunda ise yükseltici konvertör kullanılmıştır. Bu çalışmada T=25 °C G=1000W/m<sup>2</sup> durumu için fotovoltaiik sistemin DA/DA konvertör üzerinden beslediği R<sub>L</sub>=0.5, 1, ve 2 Ω gibi omik yüklerin akım gerilim karakteristikleri yine bu bölümde verilmiştir. Diğer durumlardaki akım-gerilim ve güç-gerilim grafikleri verilmiştir. Diğer durumlarda grafikler benzer trendler gösterdiklerinden bu bölümde ayrıca bu grafiklere yer verilmemiştir.

Çizelge 3. 1 T=50 °C G=100 ila 1200 W/m<sup>2</sup> değerleri arasında 100 W/m<sup>2</sup>'lik ışınım miktarındaki artışlarla elde edilen bilinmeyen parametre değerleri ile her bir duruma tekabül eden optimal gerilim, akım ve güç değerlerini göstermektedir. Bu çizelgeden görüldüğü üzere sabit sıcaklıkta ışınım düzeyi arttırıldığında maksimum güç değeri ve optimal akımın kayda değer bir artış gösterdiği buna karşın optimal gerilimin sınırlı bir artış gösterdiği görülmektedir.

Beklenildiği gibi en büyük güç değeri G=1200W/m<sup>2</sup> değerinde elde edilmiş olup bu değer 306,20 W olarak bulunmuştur. Diğer taraftan en küçük güç değeri en küçük ışınım düzeyinde 23,60 W olarak bulunmuştur. Bu sıcaklık değerinde ışınım düzeyi ile bilinmeyen parametrelerin değişimine bakıldığında diyot idealite faktörü ve parasitik direnç değerleri kendileri için tanımlanan arama uzayında farklı değerler aldığı, yani belli bir kararlılık göstermediği görülmektedir.

**Çizelge 3. 1**  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100\text{-}1200\text{ W/m}^2$  için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi.

<b>T=50+273.15 K</b>						
<b>G</b>	<b>n</b>	<b>Rs</b>	<b>Rp</b>	<b>Pm</b>	<b>Im</b>	<b>Vm</b>
100	1.17	0.11	18644	23.60	0.81	29.20
200	1.35	0.15	7964.8	47.47	1.60	29.60
300	1.54	0.18	15283	70.32	2.38	29.60
400	1.59	0.02	6107.5	95.84	3.16	30.30
500	1.52	0.08	14744	121.33	3.97	30.60
600	1.42	0.04	7147.6	149.77	4.80	31.20
700	1.25	0.09	19721	178.88	5.64	31.70
800	1.14	0.09	14855	208.47	6.49	32.10
900	1.48	0.19	4974.6	219.37	7.15	30.70
1000	1.46	0.19	9636.4	244.19	7.95	30.70
1100	1.31	0.14	3228.7	279.10	8.83	31.60
1200	1.30	0.12	5011.7	306.20	9.66	31.70

Çizelge 3. 2 ışınım miktarı değerleri 100 ila 1200  $\text{W/m}^2$  arasında  $T=25^{\circ}\text{C}$  sabit sıcaklığında elde edilmiş bilinmeyen parametre değerleri ile her bir duruma tekabül eden optimal gerilim, akım ve güç değerlerini göstermektedir. Bu çizelgeden görüldüğü üzere sabit sıcaklıkta ışınım düzeyi arttırıldığında maksimum güç değeri ve optimal akımın kayda değer bir artış gösterdiği buna karşın optimal gerilimin sınırlı bir artış gösterdiği görülmektedir. Beklenildiği gibi en büyük güç değeri  $G=1200\text{W/m}^2$  değerinde elde edilmiş olup bu değer 311,63 W olarak bulunmuştur. Diğer taraftan en küçük güç değeri en küçük ışınım düzeyinde 22,78 W olarak bulunmuştur. Bu sıcaklık değerinde ışınım düzeyi ile bilinmeyen parametrelerin değişimine bakıldığında diyot idealite faktörü ve parasitik direnç değerleri kendileri için tanımlanan arama uzayında farklı değerler aldığı, yani belli bir kararlılık göstermediği görülmektedir.

**Çizelge 3. 2** T=25 °C ve G=100-1200 W/m<sup>2</sup> için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi.

T=25+273.15 K						
G	n	Rs	Rp	Pm	Im	Vm
100	1.37	0.09	14131	22.79	0.80	28.40
200	1.41	0.03	14632	47.04	1.60	29.40
300	1.19	0.14	10156	73.52	2.43	30.30
400	1.30	0.13	7593.4	97.72	3.23	30.30
500	1.53	0.12	15543	119.37	3.98	30.00
600	1.23	0.16	13370	149.28	4.85	30.80
700	1.26	0.18	12849	173.38	5.65	30.70
800	1.40	0.09	6404.7	198.39	6.42	30.90
900	1.23	0.06	16731	230.66	7.30	31.60
1000	1.56	0.13	13945	242.32	7.95	30.50
1100	1.19	0.07	17474	285.14	8.94	31.90
1200	1.12	0.10	5011.7	311.63	9.77	31.90

Çizelge 3. 3'ye bakıldığında 10 °C'lik sabit sıcaklıkta ışınım düzeyi arttırıldığında maksimum güç değeri ve optimal akımın yine kayda değer bir artış gösterdiği buna karşın optimal gerilimin sınırlı bir artış gösterdiği görülmektedir. Beklenildiği gibi en büyük ve en küçük güç değeri G=1000 ve G=100 W/m<sup>2</sup>'lik değerlerinde meydana gelmiş olup bu değerler sırasıyla 310,37 W ve 23,70 W olarak bulunmuştur. Bu çizelgede ışınım düzeyi ile bilinmeyen parametrelerin değişimine bakıldığında, diyot idealite faktörü ile parasitik dirençler belli bir kararlılık göstermemektedir. Buradaki maksimum güç optimal akım ve gerilim değerlerini Çizelge 3. 2'deki aynı değerlerle karşılaştırıldığında %1'lik bir azalmanın olduğu görülmektedir. Bilinmeyen parametrelere bakıldığında ise Çizelge 3. 2'deki değerlerle yakın olduğu söylenebilir.

**Çizelge 3. 3** T=10 °C ve G=100-1200 W/m<sup>2</sup> için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi.

T=10+273.15 K						
G	n	Rs	Rp	Pm	Im	Vm
100	1.23	0.05	14837	23.71	0.81	29.30
200	1.28	0.03	7184.8	48.71	1.62	30.10
300	1.60	0.07	14985	71.05	2.38	29.80
400	1.24	0.02	13128	101.06	3.25	31.10
500	1.25	0.12	12218	125.62	4.05	31.00
600	1.18	0.12	15060	153.16	4.88	31.40
700	1.23	0.11	15635	178.51	5.68	31.40
800	1.53	0.19	19981	193.45	6.38	30.30
900	1.49	0.12	7686.2	222.52	7.20	30.90
1000	1.27	0.05	19461	259.34	8.10	32.00
1100	1.51	0.11	11215	273.34	8.79	31.10
1200	1.43	0.01	17233	310.38	9.67	32.10

Çizelge 3. 4 T=5°C ve G=100,200,300,...,1100 ve1200 W/m<sup>2</sup> değerlerinde tahmin edilen devre parametreleri ile optimal gerilim, akım ve güç değerlerini göstermektedir. Çizelge 3. 4'den anlaşıldığı üzere ışınlım düzeyi sıcaklık 5 °C sabit tutulmak kaydıyla arttırıldığında maksimum güç değeri ve optimal akımın yine kayda değer bir artış gösterdiği buna karşın optimal gerilimin sınırlı bir artış gösterdiği görülmektedir. En büyük ve en küçük güç değerleri beklenildiği gibi sırasıyla G=1200 ve G=100 W/m<sup>2</sup>'lik ışınlım düzeylerinde meydana gelmiştir. Bulunan bu değerler sırasıyla 306,28 W ve 24,01 W'tır. Bu çizelgede bilinmeyen parametrelerin değişimine bakıldığında, diyot idealite faktörü ile parasitik dirençler diğer çizelgedeki sonuçlara benzer şekilde belli bir kararlılık yoktur. Buradaki maksimum güç, optimal akım ve gerilim değerleri Çizelge 3. 2 ve Çizelge 3. 3'deki aynı değerlerle karşılaştırıldığında çok küçük bir azalmanın olduğu görülmektedir. Bu çizelgedeki bilinmeyen parametre değerleri diğer çizelgelerdeki değerlerle karşılaştırıldığında dikkate değer bir değişimin olmadığı görülmektedir.

**Çizelge 3. 4**  $T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100\text{-}1200\text{ W/m}^2$  için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi.

<b>T=5+273.15 K</b>						
<b>G</b>	<b>n</b>	<b>Rs</b>	<b>Rp</b>	<b>Pm</b>	<b>Im</b>	<b>Vm</b>
100	1.17	0.11	18644	24.02	0.81	29.50
200	1.35	0.15	7964.8	48.18	1.61	29.90
300	1.54	0.18	15283	71.33	2.39	29.80
400	1.59	0.02	6107.5	97.06	3.19	30.40
500	1.52	0.08	14744	122.54	4.00	30.60
600	1.42	0.04	7147.6	150.85	4.84	31.20
700	1.25	0.09	19721	179.53	5.68	31.60
800	1.14	0.09	14855	208.71	6.52	32.00
900	1.48	0.19	4974.6	220.39	7.20	30.60
1000	1.46	0.19	9636.4	245.05	8.01	30.60
1100	1.31	0.14	3228.7	279.36	8.90	31.40
1200	1.30	0.12	5011.7	306.29	9.69	31.60

Çizelge 3. 5  $T=0^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100,200,300,\dots,1100$  ve  $1200\text{ W/m}^2$  değerlerin için bulunan devre modeli parametreleri ile optimal gerilim, akım ve maksimum güç değerlerini göstermektedir. Çizelge 3. 5'e bakıldığında ışınım düzeyi sıcaklık  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  sabit tutulmak kaydıyla artırılması durumunda maksimum güç değeri ve optimal akımın önemli oranda artış gösterdiği buna karşın optimal gerilimin diğer çizelgelerdeki gibi çok küçük bir artış gösterdiği görülmektedir. Maksimum ve minimum güç değerleri beklenildiği gibi sırasıyla  $G=1200$  ve  $G=100\text{ W/m}^2$ 'lik ışınım düzeylerinde meydana gelmiştir. Bulunan bu değerler sırasıyla  $317,23\text{ W}$  ve  $23,57\text{ W}$ 'tır. Bu çizelgede bilinmeyen parametrelerin değişimine bakıldığında, diyot idealite faktörü ile parasitik dirençler diğer çizelgedeki sonuçlara benzer şekilde bazı durumlarda sınırlı artış bazı durumlarda ise sınırlı azalma göstermektedir. Buradaki maksimum güç, optimal akım ve gerilim değerleri Çizelge 3. 2, Çizelge 3. 3, Çizelge 3. 4 'deki aynı değerlerle karşılaştırıldığında çok küçük bir azalmanın olduğu görülmektedir. Benzer şekilde bilinmeyen parametre değerleri diğer çizelgelerdeki değerlerle karşılaştırıldığında dikkate değer bir değişimin olmadığı görülmektedir.

**Çizelge 3. 5**  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100-1200\text{ W/m}^2$  için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi.

<b>T=0+273.15 K</b>						
<b>G</b>	<b>n</b>	<b>Rs</b>	<b>Rp</b>	<b>Pm</b>	<b>Im</b>	<b>Vm</b>
100	1.35	0.15	7964.8	23.58	0.81	29.20
200	1.54	0.18	15283	47.14	1.60	29.50
300	1.59	0.02	6107.5	72.27	2.40	30.10
400	1.52	0.08	14744	97.71	3.20	30.50
500	1.42	0.04	7147.6	125.39	4.03	31.10
600	1.25	0.09	19721	153.79	4.87	31.60
700	1.14	0.09	14855	182.66	5.71	32.00
800	1.48	0.19	4974.6	196.65	6.41	30.70
900	1.46	0.19	9636.4	221.51	7.22	30.70
1000	1.31	0.14	3228.7	254.76	8.09	31.50
1100	1.30	0.12	5011.7	281.60	8.91	31.60
1200	1.23	0.05	14837	317.23	9.76	32.50

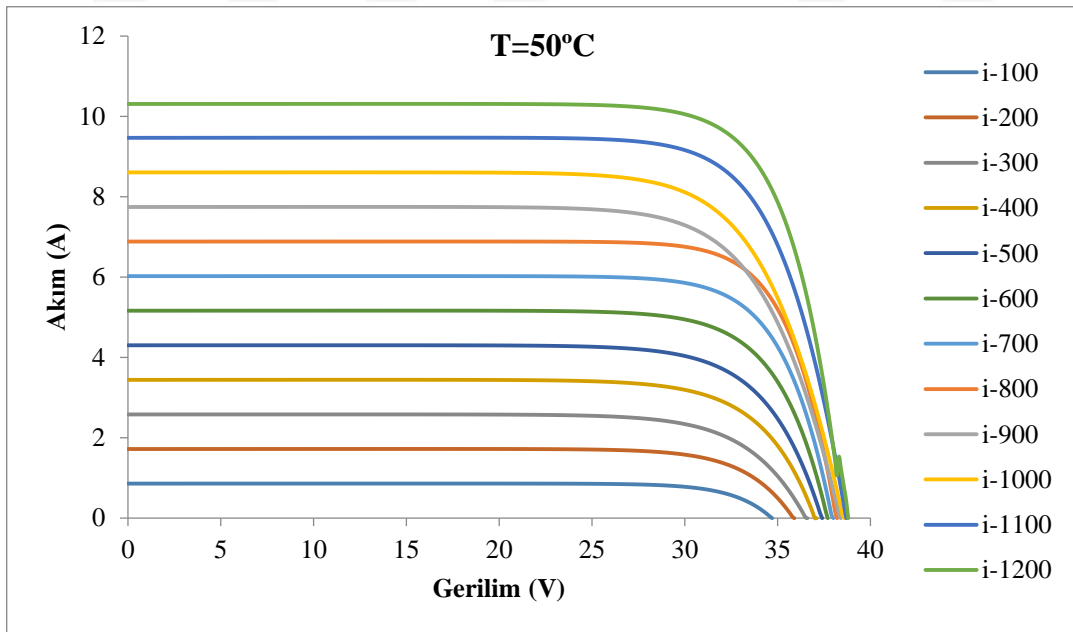
Çizelge 3. 6  $T=-5^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100,200,300,\dots,1100$  ve  $1200\text{ W/m}^2$  değerlerin için bulunan devre modeli parametreleri ile optimal gerilim, akım ve maksimum güç değerlerini göstermektedir. Çizelge 3. 6'e bakıldığında ışınım düzeyi sıcaklık  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  sabit tutulmak kaydıyla artırılması durumunda maksimum güç değeri ve optimal akımın önemli oranda artış gösterdiği buna karşın optimal gerilimin diğer çizelgelerdeki gibi çok küçük bir artış gösterdiği görülmektedir. Maksimum ve minimum güç değerleri beklenildiği gibi sırasıyla  $G=1200$  ve  $G=100\text{ W/m}^2$  lik ışınım düzeylerinde meydana gelmiştir. Bulunan bu değerler sırasıyla  $319,17\text{ W}$  ve  $24,03\text{ W}$ 'tır. Bu çizelgede bilinmeyen parametrelerin değişimine bakıldığında, diyot idealite faktörü ile parasitik dirençler diğer çizelgedeki sonuçlara benzer şekilde bazı durumlarda sınırlı artış bazı durumlarda ise sınırlı azalma göstermektedir. Buradaki maksimum güç, optimal akım ve gerilim değerleri Daha önce verilen çizelgelerdeki değerlerle karşılaştırıldığında çok küçük bir azalmanın olduğu görülmektedir. Benzer şekilde bilinmeyen parametre değerleri diğer çizelgelerdeki değerlerle karşılaştırıldığında önemli bir değişimin olmadığı söylenebilir.



**Çizelge 3. 6**  $T=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=100\text{-}1200\text{ W/m}^2$  için bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi.

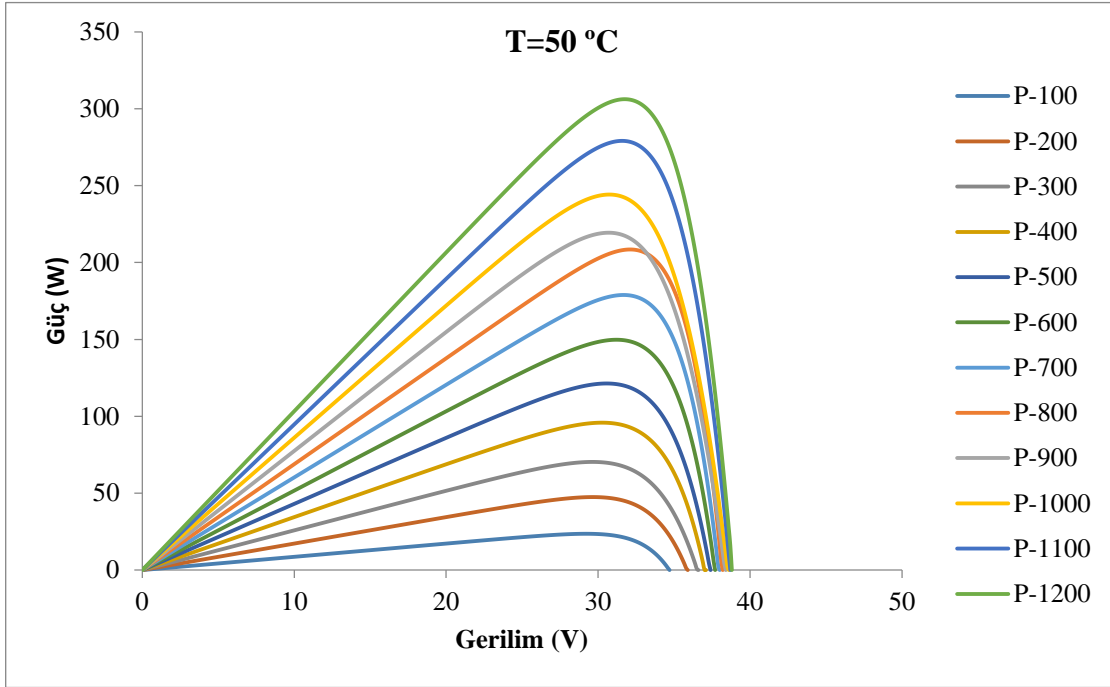
<b>T= -5+273.15 K</b>						
<b>G</b>	<b>n</b>	<b>Rs</b>	<b>Rp</b>	<b>Pm</b>	<b>Im</b>	<b>Vm</b>
100	1.28	0.03	7184.8	24.04	0.81	29.60
200	1.60	0.07	14985	47.36	1.59	29.70
300	1.24	0.02	13128	75.92	2.44	31.10
400	1.25	0.12	12218	101.15	3.25	31.10
500	1.18	0.12	15060	128.56	4.07	31.60
600	1.23	0.11	15635	154.25	4.88	31.60
700	1.53	0.19	19981	171.37	5.60	30.60
800	1.49	0.12	7686.2	199.91	6.43	31.10
900	1.27	0.05	19461	235.26	7.31	32.20
1000	1.51	0.11	11215	251.17	8.02	31.30
1100	1.43	0.01	17233	286.78	8.88	32.30
1200	1.37	0.09	14131	309.18	9.69	31.90

Şekil 3. 1  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  de  $100\text{ W/m}^2$ 'lik artışlarla  $G=100$  ila  $1200\text{ W/m}^2$  arasında akım-gerilim karakteristik eğrisini göstermektedir.



**Şekil 3. 1**  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  de  $G=100$  ila  $1200\text{ W/m}^2$  arasında I-V eğrileri.

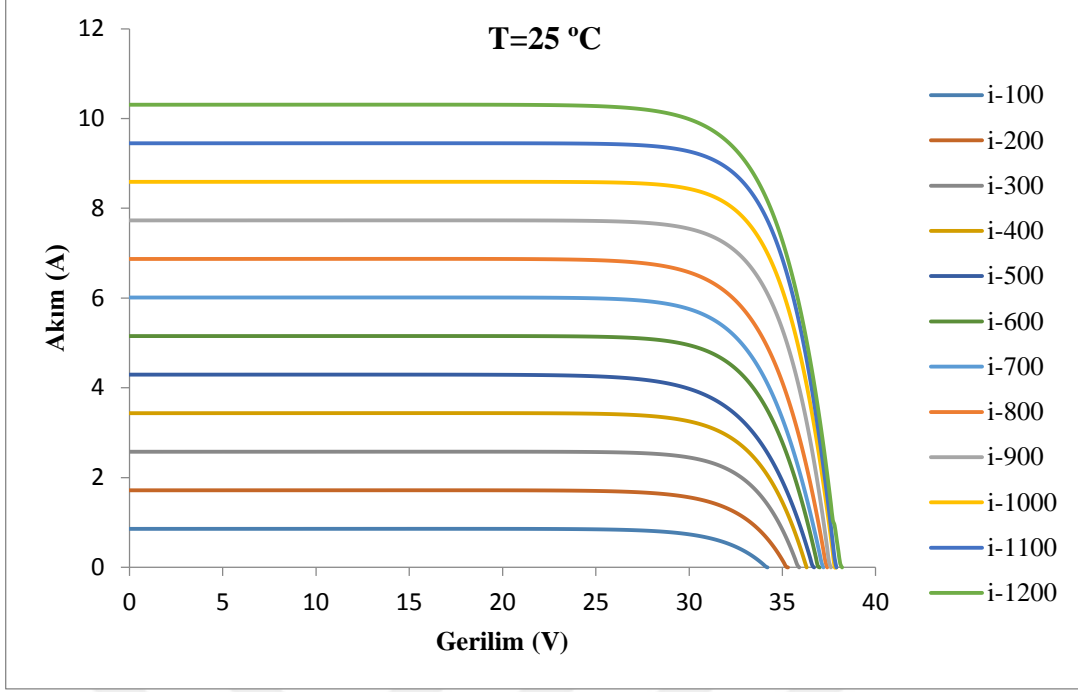
Beklenildiği gibi akım-gerilim karakteristiğinde belli çıkış gerilim değerine kadar akım sabit kalmakta bu gerilim değeri aşıldığında ise akım çok hızlı bir şekilde azalma eğilimine girip 0 değerine ulaşmaktadır. Şekil 3. 2 T=50 °C de G=100 ila 1200 W/m<sup>2</sup> arasında güç-gerilim karakteristik eğrisini göstermektedir. Bu karakteristik de maksimum güç değeri açık devre gerilim değerinin %80'ine yakın bir değerde meydana gelmektedir. Buna karşılık optimal akım değeri kısa devre akımının %10 daha az değerindedir.



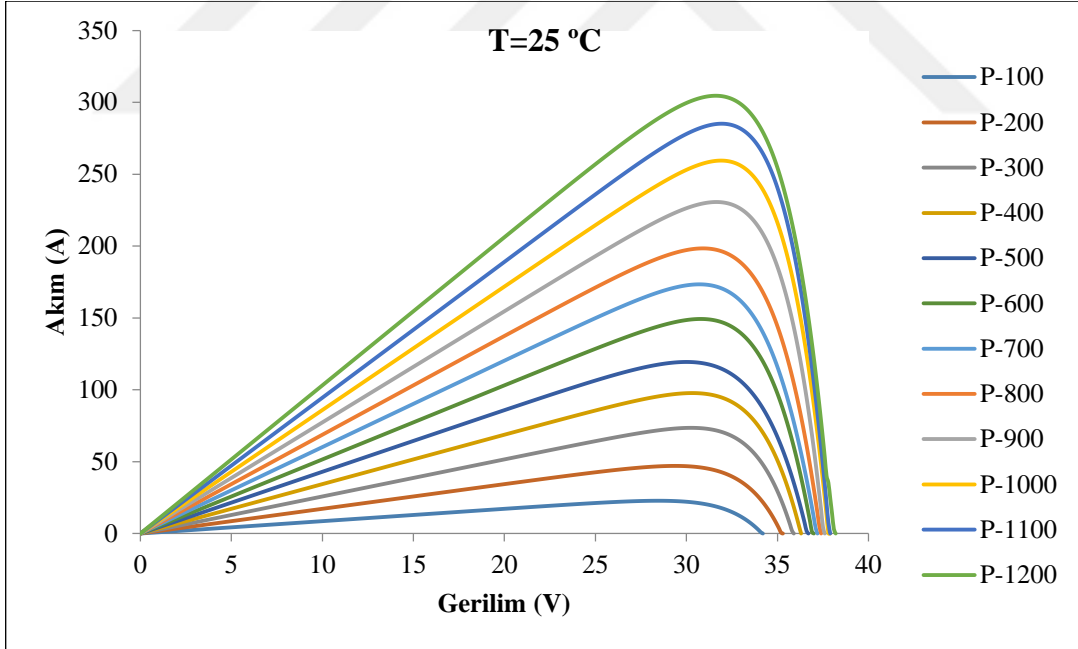
**Şekil 3. 2** T=50 °C de G=100 ila 1200 W/m<sup>2</sup> arasında P-V eğrileri.

Şekil 3. 3 T=25 °C sabit tutulan sıcaklık altında G=100 ila 1200 W/m<sup>2</sup> arasında değiştirilerek elde edilen akım-gerilim karakteristik eğrisini göstermektedir. Akım-gerilim karakteristiğinde beklenildiği gibi belli çıkış gerilim değerine kadar akım sabit kalmakta bu gerilim değeri aşıldığında ise akım çok hızlı bir şekilde azalma eğilimine girip 0 değerine ulaşır.

Şekil 3. 4 T=25 °C de G=100 ila 1200 W/m<sup>2</sup> arasında güç-gerilim karakteristik eğrisini göstermektedir. Bu karakteristik de maksimum güç değeri açık devre gerilim değerinin %80'ine yakın bir değerde meydana gelmektedir. Buna karşılık optimal akım değeri kısa devre akımının %10 daha az değerindedir.



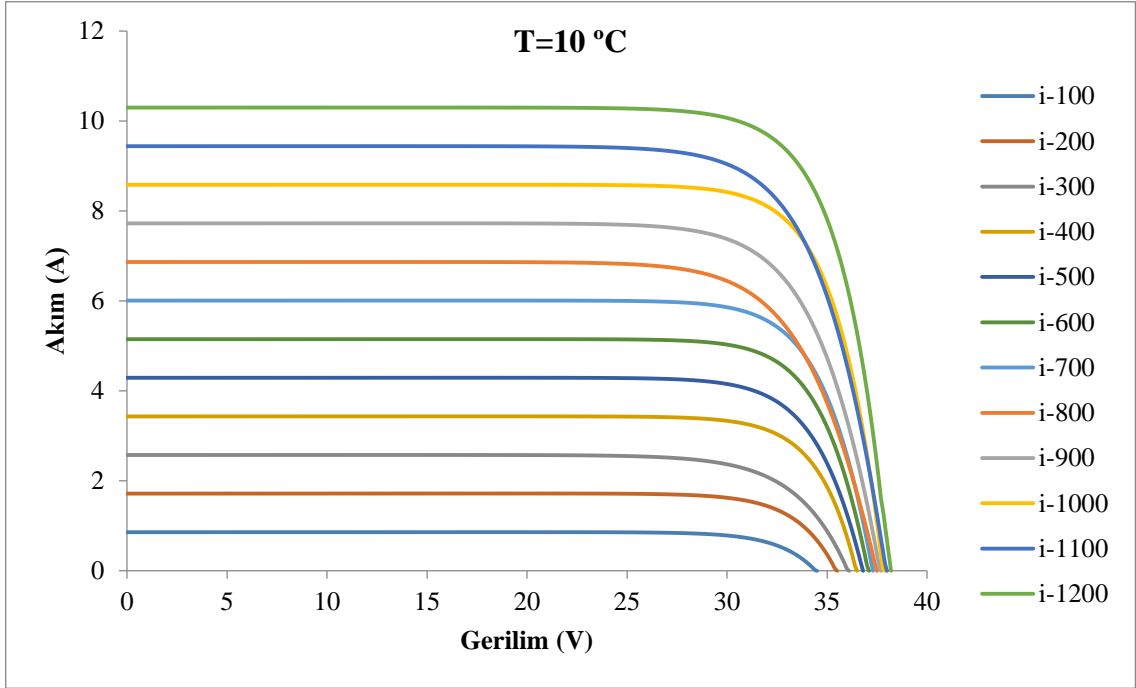
Şekil 3. 3 T=25 °C de G=100 ila 1200 W/m2 arasında I-V eğrileri.



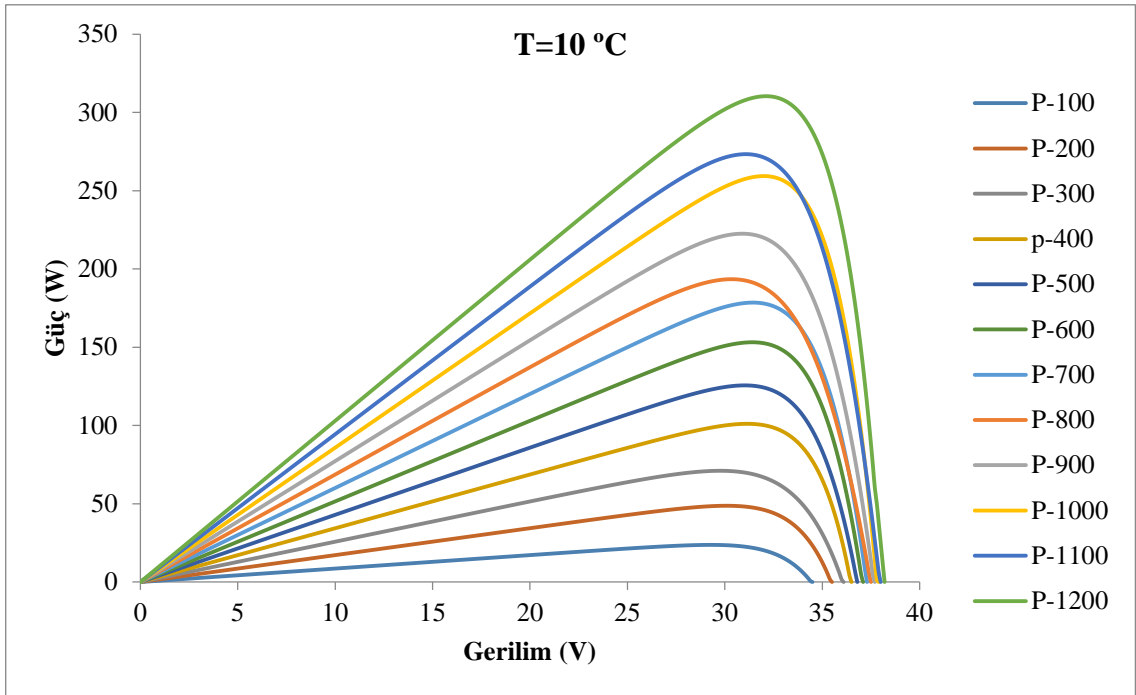
Şekil 3. 4 T=25°C de G=100 ila 1200 W/m2 arasında P-V eğrileri.

Şekil 3. 5, Şekil 3. 7, Şekil 3. 9, Şekil 3. 11, T=10 ,5 ve -5°C sabit tutulan sıcaklık değerleri altında ışınım miktarının G=100 ila 1200 W/m<sup>2</sup> arasında değiştirilmesiyle elde edilen akım-gerilim karakteristik eğrileri, Şekil 3. 6, Şekil 3. 8, Şekil 3. 10 ve Şekil 3. 12' de ise güç-gerilim karakteristikleri gösterilmektedir. Bu eğrilerden ışınım miktarının

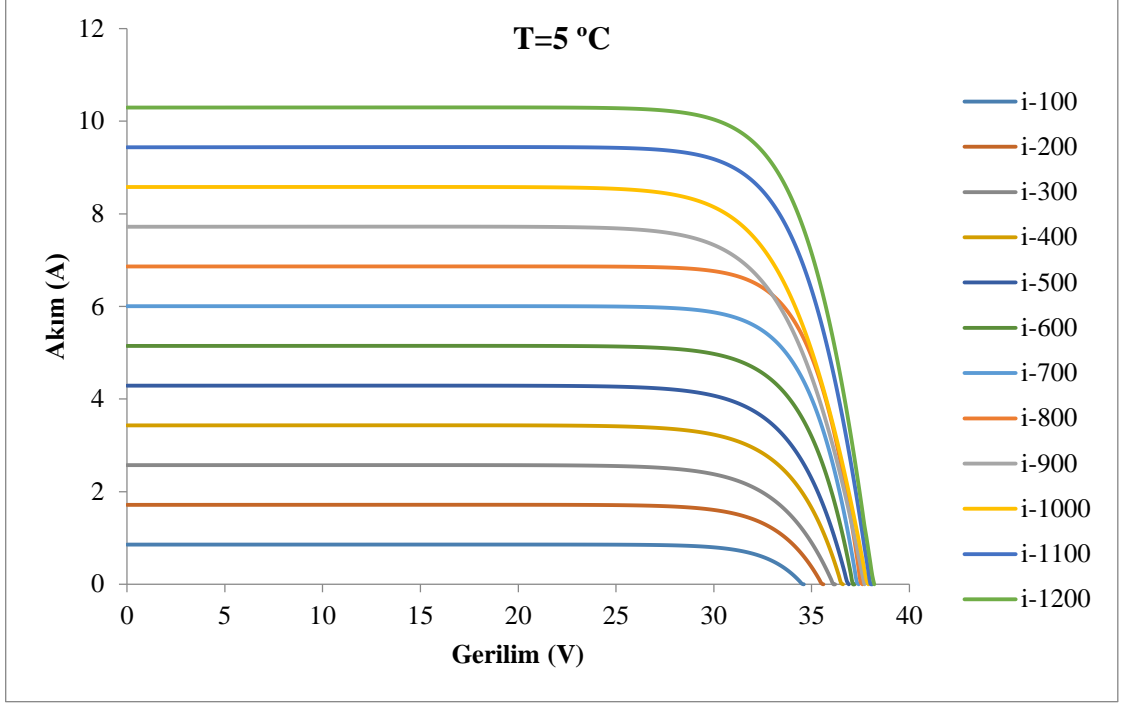
artmasının doğrudan üretilen fotovoltaik akımın artmasına neden olduğu görülmektedir. Sıcaklığın azalmasının ise üretilen fotovoltaik akımı doğrudan etkilemeyip açık devre geriliminin kısmi azalma göstermesine sebep olduğu anlaşılmaktadır.



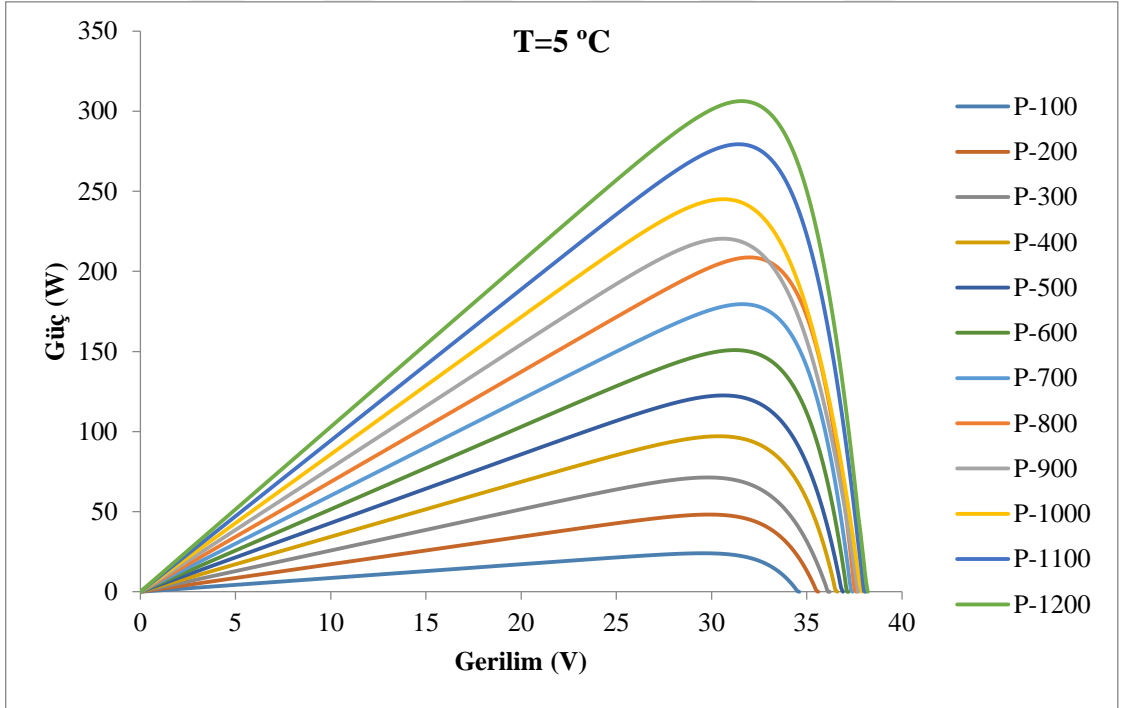
Şekil 3. 5 T=10 °C de G=100 ila 1200 W/m2 arasında I-V eğrileri.



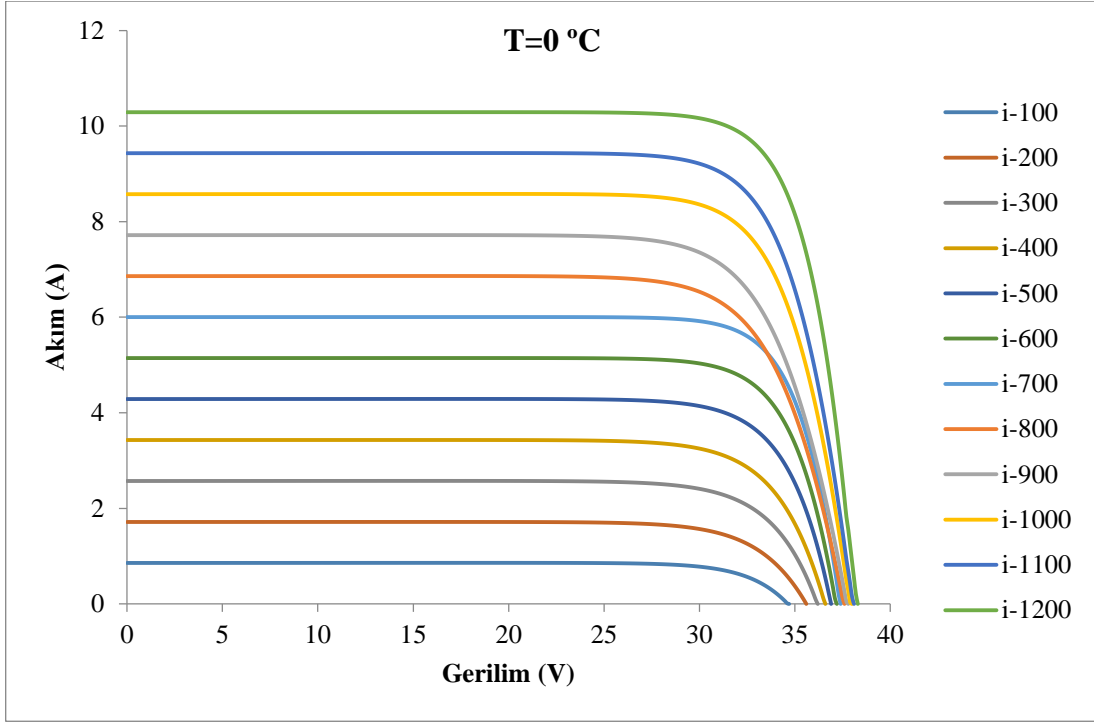
Şekil 3. 6 T=10 °C de G=100 ila 1200 W/m2 arasında P-V eğrileri.



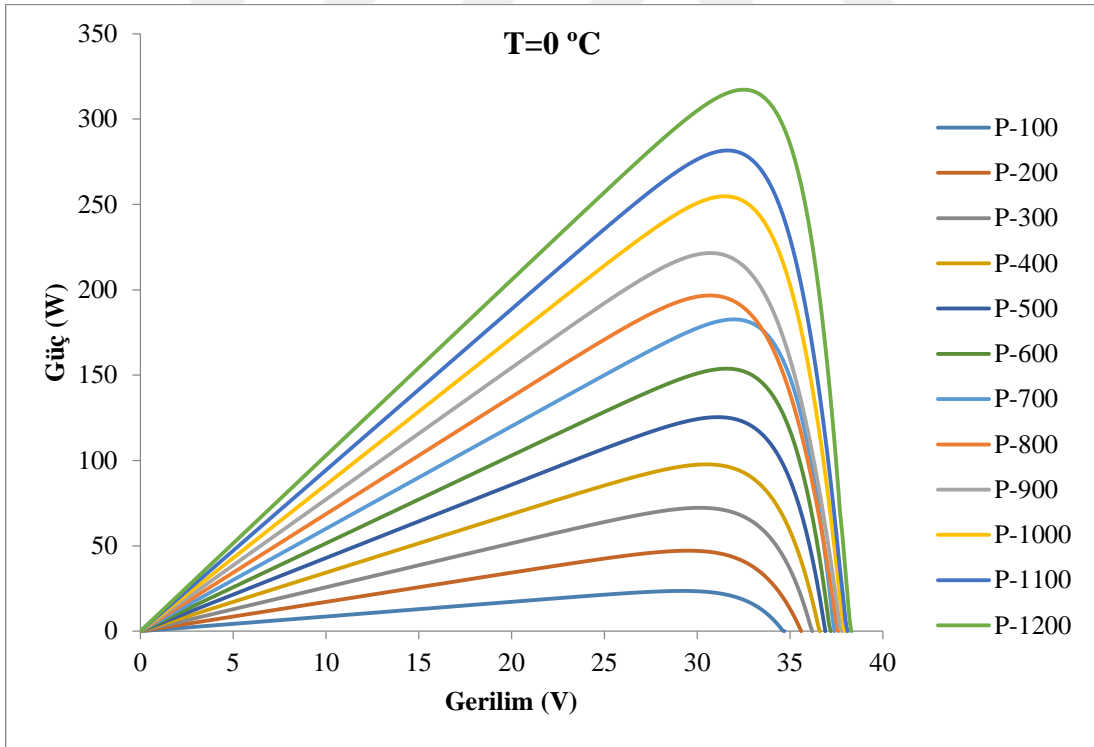
Şekil 3. 7 T=5 °C de G=100 ila 1200 W/m2 arasında I-V eğrileri.



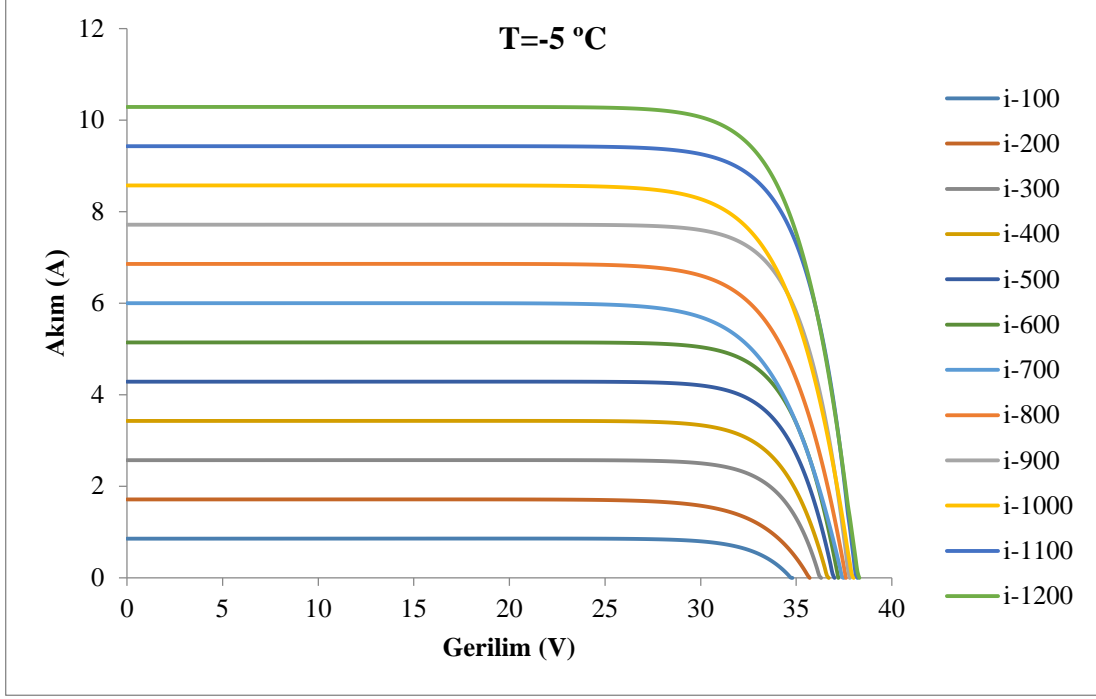
Şekil 3. 8 T=5 °C de G=100 ila 1200 W/m2 arasında P-V eğrileri.



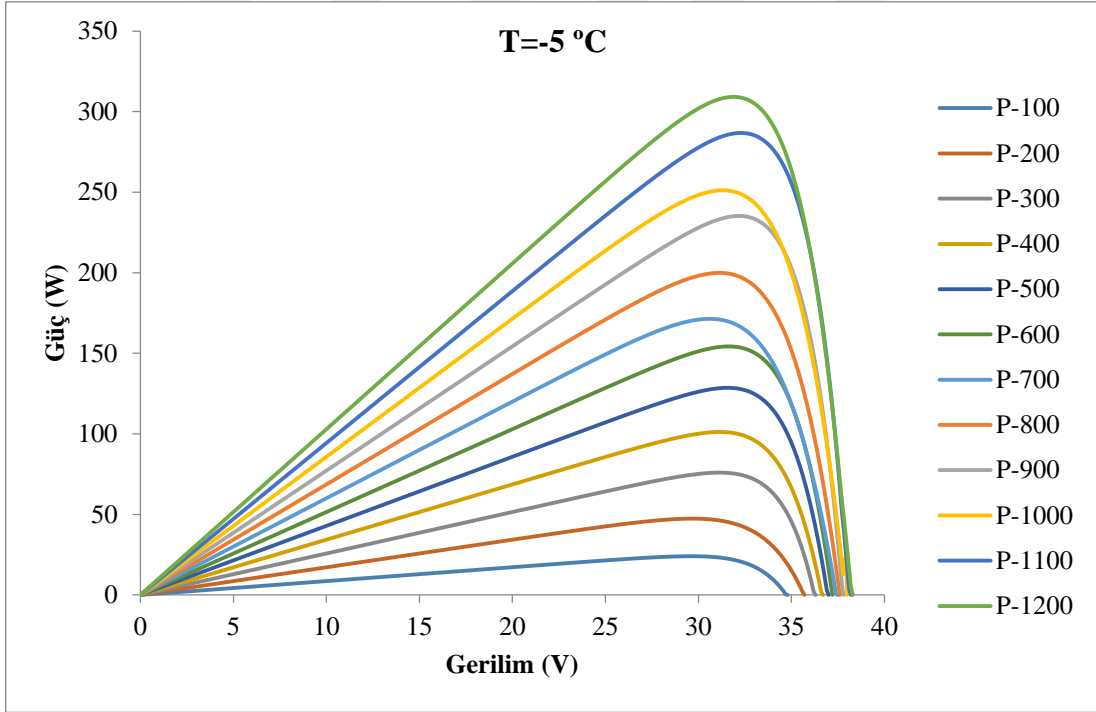
Şekil 3. 9  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  de  $G=100$  ila  $1200\text{ W/m}^2$  arasında I-V eğrileri.



Şekil 3. 10  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  de  $G=100$  ila  $1200\text{ W/m}^2$  arasında P-V eğrileri.



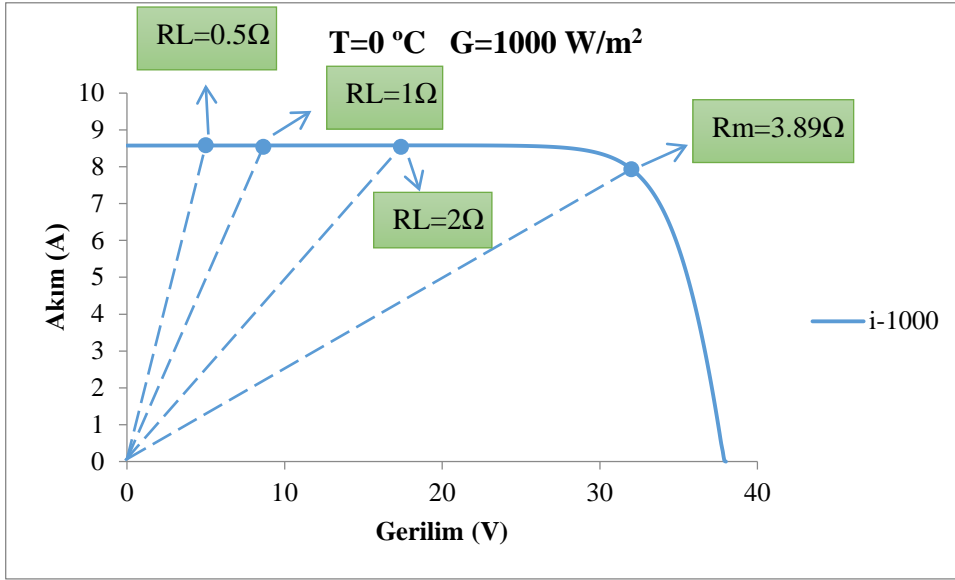
Şekil 3. 11  $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  de  $G = 100$  ila  $1200\text{ W}/\text{m}^2$  arasında I-V eğrileri.



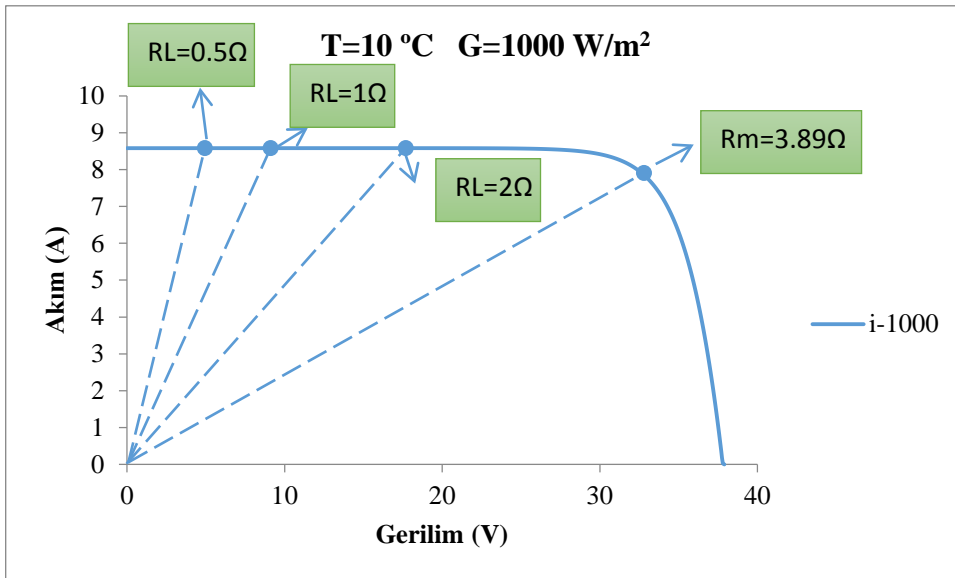
Şekil 3. 12  $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  de  $G = 100$  ila  $1200\text{ W}/\text{m}^2$  arasında P-V eğrileri.

Fotovoltaik sistemin DA/DA konvertör üzerinden omik bir yükü beslemesi durumunda anlık sıcaklık ve ışınım düzeyinin değişmesi durumunda yüke maksimum gücü

aktarabilmek için fotovoltaik sistemin çıkış gerilimi optimal gerilim değerine konvertör yardımıyla ayarlanır. Şekil 3. 13, Şekil 3. 14 ve Şekil 3. 15 sırasıyla  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarında ışınım miktarı  $G=1000\text{ W/m}^2$ 'de  $R_L=0.5, 1$  ve  $2\ \Omega$  değerlerindeki yük durumlarında akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri kullanılarak çıkış geriliminin optimal gerilim değerine ayarlanmasını göstermektedir. Bu grafiklerde  $R_m$  maksimum güç noktasındaki gerilim değerinin, maksimum güç noktasındaki akım değerine bölünmesiyle elde edilir.

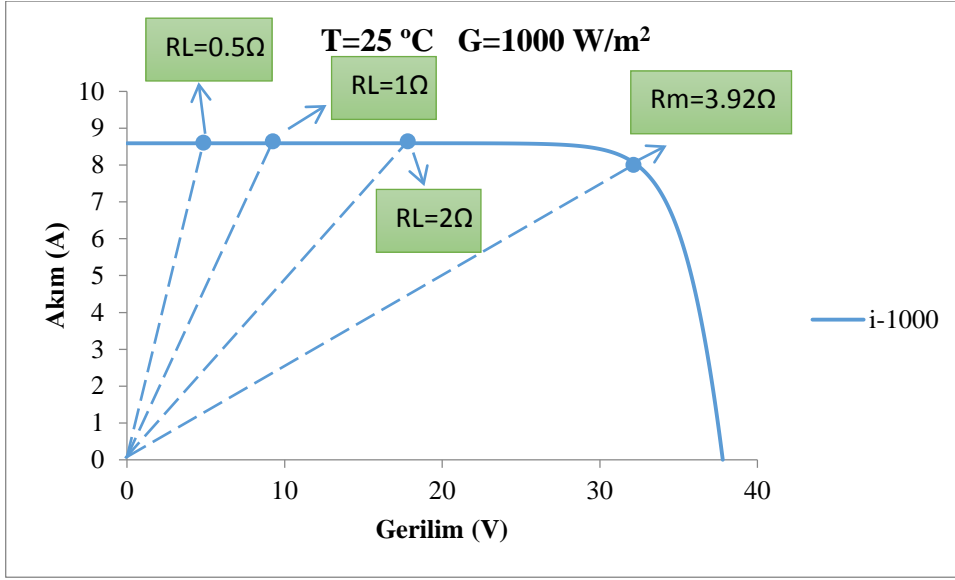


Şekil 3. 13  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=1000\text{ W/m}^2$ 'de  $R_L=0.5, 1$  ve  $2\ \Omega$  değerindeki yük durumları



Şekil 3. 14  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=1000\text{ W/m}^2$ 'de  $R_L=0.5, 1$  ve  $2\ \Omega$  değerindeki yük durumları





Şekil 3. 15  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $G=1000\text{ W/m}^2$ 'de  $R_L=0.5, 1$  ve  $2\ \Omega$  değerindeki yük durumları

## 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, tipik bir konutun çatısına sabitlenmiş fotovoltaik panellerden değişen sıcaklık ve ışınım düzeylerine göre o an mevcut olan maksimum gücün yüke aktarılması için yazılımsal yaklaşımı esas almaktadır. Bu tez çalışmasından aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Maksimum güç noktasının takibi ve elde edilmesi fotovoltaik modülün I-V ve P-V karakteristiklerinin yüksek doğrulukta elde edilmesini gerektirir. Bunun için tek-diyot devre modelinden elde edilen çıkış gerilimine bağlı akım fonksiyonundaki bilinmeyen parametrelerin en az hata ile bulunması önemlidir.

2. Otuz durum farklı ışınım düzeyi ve sıcaklık değeri için elde edilen I-V ve P-V karakteristikleri üretici firmanın standart test durumlarında ( $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1\text{ kW/m}^2$ ) elde ettiği eğrilerle izlediği trendler açısından büyük benzerlikler göstermektedir. Bu yapılan işlemlerdeki tutarlılık bakımından önem arz etmektedir.

3. Genetik algoritmalar yöntemi bilinmeyen 3 parametrenin bulunmasında oldukça güzel sonuçlar vermiştir. Daha önceki çalışmalarda parametrelerin bulunması Newton-Raphson yöntemi ile yapılmış ancak başlangıç değerlerinin uygun seçilmesi gibi sorun bu yöntemin en temel zorluğunu oluşturmuştur.

4. Fotovoltaik sistem da-da konvertör üzerinden sabit bir yükü beslemesi durumunda anlık sıcaklık ve ışınım düzeyi değişiminde yeni maksimum güç noktasının tayini için şerit enterpolasyonu kullanımı daha sağlıklı sonuçlar verebilir. Burada konvertör uçlarına bağlı yük değerinin sabit güç ve kayıpsız konvertör koşullarını esas alarak fotovoltaik sistemin girişine indirgenmelidir.

5. Maksimum güç noktası takip sisteminde da-da konvertör sadece yük uçlarındaki gerilimi optimal değere ayarlanması için kullanılır. Bura çevre koşullarına göre gerilimin arttırılması veya düşürülmesi gerekir. Bunun için 'buck' veya 'boost' tipi konvertör kullanılmalıdır. Bunların tek bir 'buck-boost' konvertörü yerine ayrı konvertörler halinde kullanılması daha doğru bir seçenektir.

6. Da-da konvertöründen istenilen çıkış gerilimini almak için konvertörün anahtarlama elemanının gerekli anahtarlama yapılarak istenilen gerilim değerine

getirilmesi gerekir. Bunun basit bir kontrol tekniği yâni darbe genişlik modülasyonu ile gerçekleştirmek mümkündür. Burada tekraren söylemek gerekirse konvektörün kayıpsız olduğu varsayılmalıdır. Darbe genişlik modülasyonu gerilimi sabit da gerilimi ile rampa gerilim dalgası ile karşılaştırılması sonucu elde edilir.

7. Da-da konvertörün istenilen çıkış değerini ürettiğinin kontrolü oransal-integral ya da PI kontrolörü ile gerçekleştirilir. Hareketli fotovoltaik sistemlerde bu farklılık gösterebilir. Bu işlem MATLAB® kodu ya da SIMULINK modeli olarak yapılabilir.

8. Genel olarak bakıldığında yapılan çalışma günümüz dünyasında hızlı bir artış gösteren fotovoltaik enerji üretiminin günlük hayatta birçok yerde minimum güneş potansiyelinin olduğu yerlerde yüksek verimle kullanımını mümkün kılar. Ancak bu çalışmanın donanım uygulaması başka bir proje kapsamında ele alınacaktır.



## 5. KAYNAKLAR

- [1] “Türkiye Elektrik Enerjisi Kuruluş Ve Yakıt Cinslerine Göre Kurulu Güç.” [Online]. Available: <http://www.teias.gov.tr/yukdagitim/kuruluguc.xls>, Erişim Tarihi:(**01.10.2015**)
- [2] “Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA),” *Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü*, [Online]. Available: <http://www.eie.gov.tr>, Erişim Tarihi (**01.10.2015**)
- [3] B. Subudhi and R. Pradhan, “Characteristics evaluation and parameter extraction of a solar array based on experimental analysis,” *2011 IEEE Ninth Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, no. December, pp. 5–8, (**2011**).
- [4] M. de Blas, “Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices,” *Renew. Energy*, vol. 25, no. 3, pp. 371–380, (**2002**).
- [5] A. Jain, “Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 81, no. 2, pp. 269–277, (**2004**).
- [6] J. Cubas, S. Pindado, and C. de Manuel, “Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function,” *Energies*, vol. 7, no. 7, pp. 4098–4115, (**2014**).
- [7] C. Zhang, J. Zhang, Y. Hao, Z. Lin, and C. Zhu, “A simple and efficient solar cell parameter extraction method from a single current-voltage curve,” *J. Appl. Phys.*, vol. 110, no. 6, p. 064504, (**2011**).
- [8] F. Ghani, M. Duke, and J. Carson, “Extraction of solar cell modelling parameters using the Lambert W- function,” *50th Annu. Conf. Aust. Sol. Energy Soc.*, no. December, (**2012**).
- [9] M. Zagrouba, A. Sellami, M. Bouaïcha, and M. Ksouri, “Identification of PV solar cells and modules parameters using the genetic algorithms: Application to maximum power extraction,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 5, pp. 860–866, (**2010**).
- [10] J. K. Maherchandani, C. Agarwal, and M. Sahi, “Estimation of Solar Cell Model Parameter by Hybrid Genetic Algorithm Using MATLAB,” *Int. J. Adv. Res. Comput. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 6, pp. 78–81, (**2012**).
- [11] M. R. Alrashidi and M. F. Alhajri, “Extraction of Photovoltaic Characteristics Using Simulated Annealing,” pp. 77–79, (**2014**).
- [12] M. Ketkar, “Efficient Parameter Extraction of Solar Cell using Modified ABC,”

- vol. 102, no. 1, pp. 1–6, (2014).
- [13] A. Biswas, S. Das, A. Abraham, and S. Dasgupta, “Stability analysis of the reproduction operator in bacterial foraging optimization,” *Theor. Comput. Sci.*, vol. 411, no. 21, pp. 2127–2139, (2010).
- [14] M. Turhan, B. Dai, D. Yöldöröm, A. Modeling, and S. Panel, “Analytical MPPT Solution Using Thevenin Approach for Solar Panels,” no. July, pp. 803–808, (2013).
- [15] A. Chatterjee, S. Member, and A. Keyhani, “Thevenin’s equivalent of photovoltaic source models for MPPT and power grid studies,” *Power Energy Soc. Gen. Meet. 2011 IEEE*, pp. 1–7, (2011).
- [16] Z. Batushansky, “Thevenin-Based Approach to PV arrays Maximum Power Prediction,” pp. 598–602, (2010).
- [17] H. Patangia, S. Gupta Gouriseti, A. Siddiqui, and S. Sharma, “A simplified PV model for low power MPPT controller design,” *2010 IEEE Asia Pacific Conf. Circuits Syst.*, pp. 680–683, (2010).
- [18] C. Honsberg and S. Bowden, “Solar Cell Operation.” [Online]. Available: <http://pveducation.org/pvcdrom/instructions>, (2015).
- [19] Ş. Yilmaz, E. Kiliç, R. Özçalık, and A. Ganİ, “Fotovoltaik ( PV ) Güneş Pilinin İki Diyotlu Modellenmesi Photovoltaic ( PV ) Solar Battery Modeling of Two-Diode,” pp. 1–6.
- [20] K. Ishaque and Z. Salam, “An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE),” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2349–2359, (2011).
- [21] D. S. H. Chan and J. C. H. Phang, “Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 34, no. 2, pp. 286–293, (1987).
- [22] M. R. Alrashidi, K. El-Naggar, and M. F. Alhajri, “Parameters Estimation of Double Diode Solar Cell Model,” *Waset.Org*, vol. 7, no. 2, pp. 100–103, (2013).
- [23] M. H. Rashid, *Power Electronics*. (2015).
- [24] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, “PV panel model based on datasheet values,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, no. 4, pp. 2392–2396, (2007).
- [25] Ç. T. Gül Gökay Emel, “Genetik Algoritmalar ve Uygulama Alanları,” *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi*, vol. 21, no. 1, pp. 129–152, (2002).

# ÖZGEÇMİŞ

## ***Kişisel Bilgiler***

Soyadı, adı : AKTAŞ, Melih  
Uyruğu : T.C  
Doğum tarihi ve yeri : 28.08.1989 / ANKARA  
Telefon : 0505 787 19 68  
E-posta : [melihakts@gmail.com](mailto:melihakts@gmail.com)

## ***Eğitim***

<b>Derece</b>	<b>Eğitim Birimi</b>	<b>Mezuniyet Tarihi</b>
Yüksek Lisans	Düzce Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2015
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Elektrik Öğretmenliği	2011
Lise	Yavuz Sultan Selim Anadolu Lisesi	2007

## ***İş Deneyimi***

<b>Yıl</b>	<b>Yer</b>	<b>Görev</b>
2014-2015	Düzce Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

## ***Yabancı Dil***

İngilizce: YDS (Yabancı Dil Bilgisi Seviye Tespit Sınavı): 75 (EYLÜL 2014)

## ***Yayımlar***

Elibol E., Aktaş M., Tutkun N., “Farklı panel tipleri için eşdeğer devre modelinin parametre değerlerinin bulunması” VI Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi (EVK 15), 102-106, Sakarya, 2015

Aktaş M., Tutkun N., Arslan F., “Utilization of a Low Power Wind Turbine With The Self-Excited Induction Generator For Heating Rural Areas”, Journal Of Engineering Research and Applied Science, 2015